

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

Архитектурно-строительный институт

(наименование института полностью)

Центр архитектурных, конструктивных решений и организации
строительства

(наименование)

08.04.01 Строительство

(код и наименование направления подготовки)

Строительство, эксплуатация и реконструкция зданий и сооружений

(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Самоуплотняющийся бетон с применением бетонного лома

Обучающийся

С.А. Яковлев

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный

руководитель

канд. техн. наук, доцент, В.Н. Шишканова

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2024

Содержание

Введение	4
1 Анализ опыта переработки и применения бетонного лома в технологии бетона.....	8
1.1 Отечественный и мировой опыт применения бетонного лома в технологии бетона	8
1.2 Сырьевая база получения заполнителей из бетонного лома.	12
1.3 Оборудование для переработки бетонного лома и получения вторичных заполнителей.....	13
1.4 Способы повышения качества заполнителей на основе бетонного лома.....	24
2 Свойства щебня, песка, полученных путем дробления и отсева бетонного лома и методика исследования.....	31
2.1 Характеристики материалов	31
2.1.1 Гранулометрический состав продукта дробления	31
2.1.2 Свойства щебня, полученного путем дробления и отсева бетонного лома.....	35
2.1.3 Свойства песка, полученного путем дробления и отсева бетонного лома.....	37
2.2 Характеристики применяемых материалов	38
2.2.1 Портландцемент	38
2.2.2 Мелкий заполнитель	41
2.2.3 Крупный заполнитель.....	44
2.2.4 Химические добавки.....	48
2.2.5 Применяемые микрозаполнители.	50
2.3 Методика проведения исследований и применяемое оборудование. ...	54
3 Самоуплотняющийся бетон из продукта дробления бетонного лома.	58
3.1 Использование щебня из дроблёного бетона в качестве крупного заполнителя	58

3.2	Определение состава бетона с учетом структурных характеристик ...	61
3.3	Физико-механические свойства самоуплотняющегося бетона с крупным заполнителем из бетонного лома.	63
3.4	Влияние добавок на пористость и водопоглощение самоуплотняющегося бетона	73
3.5	Оценка экономической эффективности внедрения самоуплотняющихся бетонов.....	74
	Заключение.....	80
	Список используемой литературы и используемых источников	81

Введение

Проблема утилизации строительных отходов является важным вопросом для всего мира. В течение последних лет в ряде стран проводятся исследования, которые направлены на исследование способов переработки бетонных обломков и железобетона, а также оценка технических, экономических, социальных и экологических особенностей использования получаемого продукта.

Применение строительных отходов и материалов, которые были получены в результате переработки бетона и железобетона при сносе зданий и сооружений, могут иметь ряд особенностей.

1. Данное решение может позволить сократить объем отходов, которые в противном случае были бы отправлены на свалку.

2. Помогает сберегать природные ресурсы, поскольку вторичное сырье может быть использовано вместо первичных материалов.

3. Не исключено, что это может быть экономически выгодным, так как затраты на переработку отходов и производство вторичных заполнителей могут оказаться дешевле, чем затраты на добычу природного материала.

В целях решения возникшей проблемы предлагается использование самоуплотняющегося бетона с применением полученных заполнителей из бетонного лома. С помощью данного материала можно более рационально использовать отходы, которые образуются в результате проведения работ по демонтажу зданий и сооружений.

Цель исследования в диссертационной работе является разработка технологического решения, которое позволит получить с возможностью последующего применения в строительной промышленности, самоуплотняющийся бетон, который будет основан на заполнителях, из ранее переработанных бетонных, железобетонных конструкций.

Для достижения этой цели был поставлен ряд задач:

- доказать, что возможно произвести самоуплотняющийся бетон, используя в качестве заполнителей материалы, полученные из

переработанного лома бетона.

- получить зерновой состав заполнителей, который будет соответствовать оптимальной гранулометрической кривой;

- изучить физико-механические свойства самоуплотняющихся бетонов с примененным бетонным ломом;

- Определить эффективность предлагаемого технологического решения с точки зрения экономической эффективности.

Объект исследования магистерской диссертации:

- самоуплотняющийся бетон с назначенной структурой, изготовленный из материалов, которые получены в результате дробления бетонного лома.

Предмет исследования. – физико-механические свойства, структурообразование самоуплотняющегося бетона, в основе которого лежат заполнители из переработанного бетона.

Методы исследования магистерской диссертации:

В процессе исследования, были проанализированы научные и патентованные источники информации, в которых рассматривались вопросы переработки и использования переработанного бетона, а также вопросы разработки составов самоуплотняющихся бетонов. Помимо этого, была рассмотрена литература, посвященная строительному материаловедению.

В процессе исследования были задействованы как теоретические, так и экспериментальные методы.

Проведение исследований свойств самоуплотняющегося бетона было проведено в соответствии с действующими стандартами.

Научная новизна работы:

В представленном исследовании проведен сравнительный анализ влияния различных сочетаний вторичного заполнителя, который был получен из переработанного бетона, на свойства самоуплотняющегося бетона, в том числе с учетом использования тонкодисперсного модификатора.

Согласно теоретическим соображениям, возможно создание самоуплотняющегося дробленого бетона, также с использованием тонкодисперсной и расширяющей добавки.

Теоретическая и практическая значимость работы:

В ходе исследований было доказано, что можно производить высокопрочный самоуплотняющегося бетон на основе заполнителя из переработанного бетона, который может соответствовать и дополнять теорию композиционных материалов. В процессе создания самоуплотняющегося бетона следует применять сочетание суперпластификатора, заполнителя из измельченного бетона и композиционного вяжущего с микрозаполнителями.

Методология и методы диссертационного исследования:

Данная работа была выполнена с использованием различных методов исследования, таких как анализ, сравнение и эксперименты с обработкой результатов.

В основе методологии лежит использование системно-структурного метода для изучения материалов, которые используются в строительстве. Он помогает исследовать их с точки зрения структуры, свойств и нахождения взаимосвязей между ними.

Испытания проводились с использованием лабораторных образцов. Они были изготовлены и протестированы на современном оборудовании, расположенном в «Центре архитектурных, конструктивных решений и организации строительства».

Апробация работы осуществлялась на протяжении выполнения всей магистерской диссертации. Результаты работы были доложены на следующих научно-практических конференциях:

– «Всероссийская студенческая научно-практическая междисциплинарная конференция.»;

– «VII Международная научно-практическая конференция.»

А также опубликованы научные статьи по данной тематике.

– Шишканова В.Н., Яковлев С.А. Самоуплотняющийся бетон с применением бетонного лома / В.Н. Шишканова, С.А. Яковлев // «Молодежь. Наука. Общество» – 2023 г.

– Шишканова В.Н., Яковлев С.А. Бетон на заполнителе из бетонного лома / В.Н. Шишканова, С.А. Яковлев // «Лучшие научные исследования студентов и учащихся» – 2024 г.

Структура и объём работы.

Работа состоит из введения, 3 глав (разделов), заключения, содержит 37 рисунков, 11 таблиц, список используемой литературы. Основной текст работы изложен на 86 страницах машинописного текста.

1 Анализ опыта переработки и применения бетонного лома в технологии бетона

1.1 Отечественный и мировой опыт применения бетонного лома в технологии бетона

Большинство городов в настоящий момент занимаются демонтажем старого жилья, возведенного по стандартным образцам в период с 1957 по 1968 год, и перемещение людей в новые жилые строения. Программа по обновлению жилищного фонда коснется огромное количество людей и представляет из себя по первичным оценкам около 25 млн. м² недвижимости [41].

В период с 1957 по 1968 годы при строительстве были распространены технологии сборно-панельного строительства. При строительстве использовались железобетонные элементы, произведенные на заводах, которые собирались на строительных площадках. Сегодня, в связи со значительным износом и невозможностью проведения капитального ремонта такого жилья, необходимо провести реновацию жилых домов, заменив их на новые, более комфортные и безопасные.

Программа реновации зданий может столкнуться с проблемой образования большого количества строительных отходов в процессе демонтажных работ, однако, эти материалы, если использовать их повторно, могут стать значительным источником ресурсов для строительной отрасли.

Основная часть строительных отходов при демонтажных работах представлена обломками лома железобетонных и бетонных конструкций. Для их переработки используются разные способы, в том числе отделения арматуры от бетона с последующим переправлением, а также получение щебня и песчаного отсева.

Существует ряд особенностей использования продуктов переработки бетона и железобетона, которые были получены при сносе зданий:

- Благодаря этому решению появилась возможность уменьшить

объем отходов, которые в противном случае были бы отправлены на свалку.

– Использование вторичного сырья позволяет сберечь природные ресурсы.

– Возможность на получения прибыли, в связи с тем, что затраты, связанные с переработкой отходов, а также производством вторичного сырья будут менее затратными, чем затраты на добычу и производство первичных материалов.

«Экономический эффект, получаемый от утилизации отходов, складывается из многих факторов, часто специфических для того или иного вида отходов. Только в Москве организовано более десятка комплексов по утилизации железобетонных отходов в местах наибольшего их скопления» [40].

«Отходы строительной промышленности дешевле природного сырья. Часто они почти сразу (после минимальной переработки) годятся для применения в качестве заполнителей» [40].

Исследования в области использования вторичных заполнителей продолжаются уже около 70 лет, не только в России, но и за рубежом

«В последнее время несмотря на то что техногенное сырье используется в нашей стране крайне редко из-за малоизученности свойств, производство вторичных материалов на его основе растет и набирает темпы, и оно становится серьезной альтернативой традиционным строительным материалам», говорится в исследовании [35].

В работе автора [30] было рассмотрено применение бетонного лома в качестве заполнителей в бетон в виде вторичных заполнителей, при замене природного щебня и песка, автор утверждает, что на данных заполнителях возможно получение бетонов класса В40.

Исследователь П.И. Глужге, в послевоенный период занимался исследованиями в этой сфере. Согласно заявлению Глужге, сделанному в 1946 году он утверждал, что бетон, который был изготовлен из вторичного материала, обладает большей прочностью на растяжение, при изгибе при

одних и тех же значений прочности на сжатие, чем бетон, который содержит природный заполнитель [7].

В 70-х годах прошлого века возник интерес по всему миру к повторному использованию бетона. Этот интерес обусловлен необходимостью улучшения состояния окружающей среды, поиском доступных материалов для строительства, и охраной природных ресурсов.

Решения, связанные с переработкой железобетонного лома, с дальнейшим его применением в качестве вторичного заполнителя, позволяет значительно снизить использование природных ресурсов, а также сократить наличие отходов.

В 1984 году научно-исследовательские институты и организации разработали и опубликовали следующие рекомендации:

«Рекомендации по технологии разрушения некондиционных бетонных и железобетонных изделий механическим способом» [27].

«Рекомендации по переработке и использованию отходов предприятий сборного железобетона» [27].

В этих документах были описаны методы переработки бетонного лома, а также рекомендации по использованию полученных вторичных материалов для производства новых строительных материалов. Это дает возможность не только уменьшить количество отходов, вследствие строительных работ, но и получать более доступные материалы, которые будут доступны широкому кругу потребителей.

Первоначальное применение бетонного лома в цементных растворах заключается в том, что он является вторичным заполнителем песка, щебня и гравия. Так же возможно использование его в качестве заменителя портландцемента в качестве вяжущего, из переработанной мелкой фракции, которая была получена после дробления, это также отмечается в исследовании [4].

Согласно статистике Евростата, в 2016 году страны Европейского союза произвело примерно 374 млн т. отходов от строительства и 89% из них

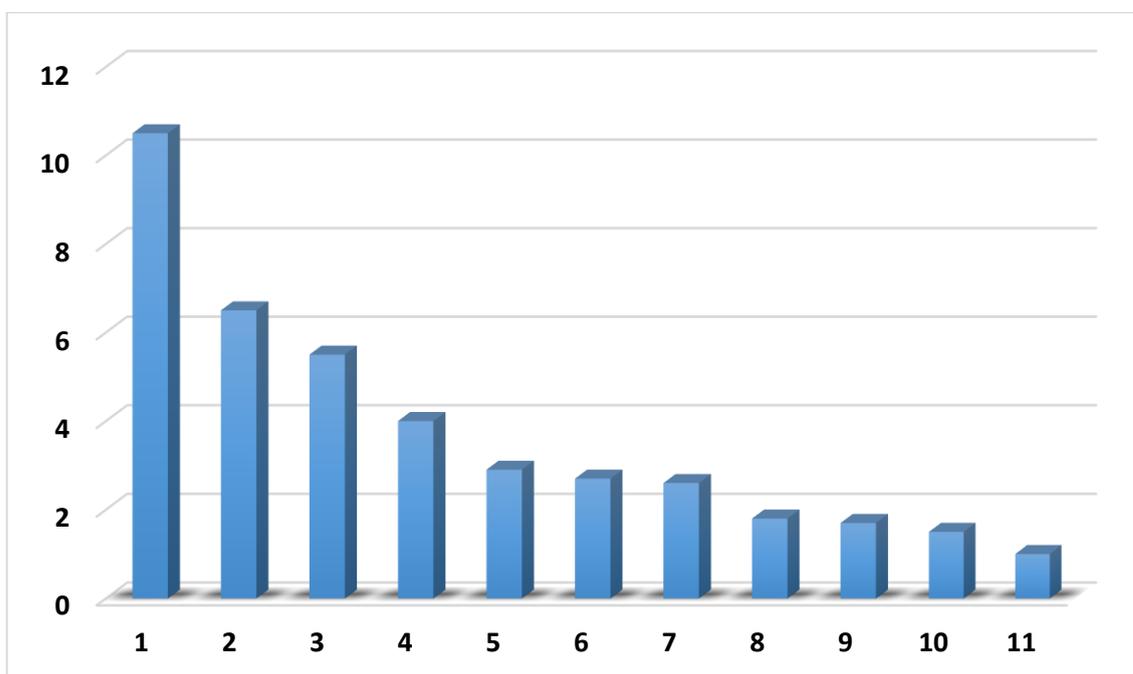
было повторно использовано или направлено на дальнейшую переработку [53]. На рисунке 1 проиллюстрирован уровень потребления вторичного заполнителя.

Ряд иностранных компаний такие как:

- HeidelbergCement AG (Германия);
- LafargeHolcim Ltd (Швейцария);
- Green Stone Materials (США).

Пытаются сделать все возможное в развитии новых технологий переработки строительных отходов и производства вторичных материалов, которые могут быть использованы в строительстве.

Благодаря этому, возможности использования вторичных материалов в строительстве продолжают расширяться, в результате этого удается снизить затраты на производство материалов, и уменьшать негативный экологический след человеческой деятельности.



Шкалы: 1 – Китай, 2 – Центральная Америка, 3 – Индия, 4 – Австралия, 5 – Южная Европа, 6 – Южная Америка, 7 – Азиатско-Тихоокеанский регион, 8 – Ближний Восток, 9 – Африка, 10 – Страны СНГ, 11 – Северная Европа.

Рисунок 1 – Уровень мирового производства вторичных заполнителей, в %

В России были проведены исследования, целью которых было изучение возможностей использования вторичного бетона. Эти исследования были использованы при разработке следующей нормативной документации: ГОСТ 32495-2013 «Щебень, песок и песчано-щебеночные смеси из дробленого бетона и железобетона» [18].

Если рассматривать требования, предъявляемые стандартом ГОСТ 26633-2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия» [15], стоит отметить, что он допускает применение вторичного щебня и гравия в качестве заполнителя, средняя плотность которого находится в диапазоне от 2000 до 3000 кг/м³.

1.2 Сырьевая база получения заполнителей из бетонного лома.

В результате переработки, мы получаем две группы материалов. Некоторая однородная продукция, которая будет использоваться для переработки большого количества отходов с определенными постоянными параметрами и количеством, а также получаем продукцию неоднородную, у которой постоянно варьируются параметры, характеристики и поступающее количество материала.

«Технология глубокой переработки железобетонного лома в достаточной степени обработана и при соблюдении установленных требований, в первую очередь связанных с тщательной сортировкой поступающего сырья, позволяет получать качественную продукцию в виде щебня требуемых фракций. Однако отсутствие нормативной базы сдерживает его повторное использование в производстве бетонов» [8]

Продукт дробления бетонных и железобетонных конструкций, в большинстве случаев, будет получен из материалов, которые имеют срок эксплуатации в несколько десятков лет.

В течение периода эксплуатации здания или сооружения, бетоны в них подвергались различным воздействиям: воздействию влаги, механическому повреждению, замораживанию и оттаиванию, воздействию

газа, солнечной радиации и другим воздействиям, зависящим от места положения объекта.

С учетом этого факта, становится понятно, что его характеристики могут значительно измениться с течением времени по сравнению с первоначальными свойствами.

В работе зарубежных авторов [48], связанной с продуктом бетонного лома, в качестве заполнителей в бетон излагается, что использование данного материала негативно сказывается на прочностных характеристиках бетона.

1.3 Оборудование для переработки бетонного лома и получения вторичных заполнителей

Для переработки отходов, полученных в результате переработки бетона, можно воспользоваться специальными дробильно-сортировочным техникой, первоначально созданной для дробления горных пород. В наше время уже существуют специальные устройства, которые могут эффективно работать с материалами из бетона и соответствовать определенным требованиям к виду деятельности конкретного предприятия, что способствует повышению общей эффективности, конкретной организации.

Процесс дробления и спецификации представляет собой сложную цепочку технологических операций, которые включают в себя следующие этапы: прием сырья с его предварительной обработкой, сортировка по размеру фракции материала, измельчение материала, перевозка на склад конечного продукта или при необходимости для последующей обработки, а также извлечение арматуры при взаимодействии с железобетонными конструкциями.

Для переработки строительных отходов, можно использовать как стационарные дробильно-сортировочные установки, так и мобильные установки, которые могут устанавливаться на общем шасси.

Физико-механические свойства сырья, а также требования к

получаемому продукту являются основными составляющими в процессе конструирования данных установок.

В качестве примера можно привести, что состав и степень загрязнения материала оказывает влияние на выбор типа дробилки. Кроме того, в процессе сортировки отходов важно учитывать наличие оборудования с колосниковым грохотом для предварительной сортировки.

В зависимости от того, какая именно перерабатываемая продукция необходима и какова ее фракционная структура, зависит выбор и количество требуемой техники для дробления и сортировки. После установки дробилок, которые работают на первом и втором этапах дробления, следует установка железоотделителей.

Данный комплекс можно разбирать и транспортировать по частям, а для его установки обычно достаточно подготовленной бетонированной площадки или плит на местности. Кроме того, необходимость в сложных фундаментах не возникает.

В настоящий момент известно множество видов дробилок, которые используются для дробления твердых пород, а также иных материалов. Эти виды дробилок можно классифицировать по форме их дробящего устройства на следующие категории.

В настоящее время в России для дробления и переработки бетонного лома используются щековые дробилки зарубежного производства. Пример данного дробильного оборудования проиллюстрирован на рисунке 2.

«Щековая дробилка является универсальной машиной для дробления материалов. Применяется на горных породах любой прочности, на шлаках, некоторых металлических материалах. Применение невозможно на вязкоупругих материалах, таких как древесина, полимеры, определённые металлические сплавы. Входная крупность достигает 1500 мм. Крупность готового продукта для небольших дробилок составляет до 10 мм. Щековые дробилки имеются во всех классах дробления: крупном, среднем и мелком.

Щековая дробилка, как правило, применяется на первичной стадии дробления, обеспечивая коэффициент измельчения от 4:1 до 7:1» [44].

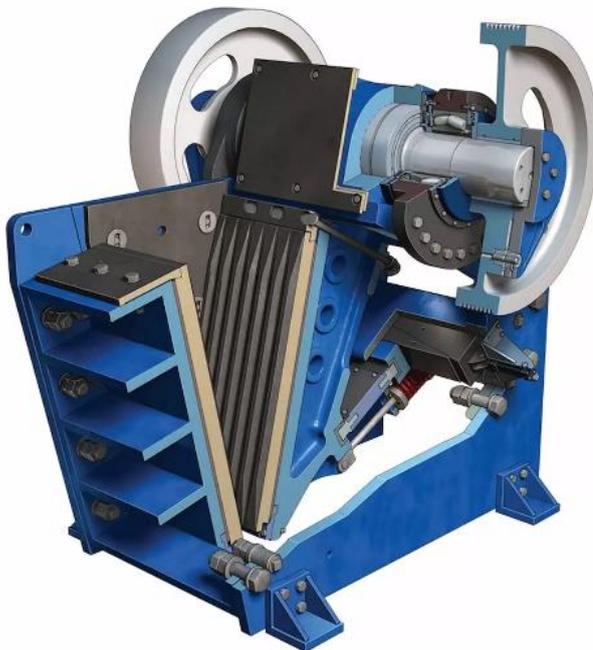


Рисунок 2 – Дробильное оборудование щекового типа

С помощью щековых дробилок можно раздробить материал на более мелкие фракции, используя принцип движения щек. Крупный материал помещается в дробилку, где движущаяся щека сдавливает его между собой и стационарной щекой, что помогает раздробить материал на более мелкие части.

Движущаяся щека, шарнирно установлена к подвижной или неподвижной оси, перемещается по направлению к неподвижной оси или в обратное направление в зависимости от типа закрепления. Существуют дробилки, оснащённые двумя движущимися щеками, которые приближаются друг к другу.

Сырье в данные дробилки поступает как правило сверху, чтобы оно оказалось в пространство между двух щек. Размер получаемого продукта зависит от установленного расстояния между подвижной и неподвижной частью дробилки, то есть от ширины выходной щели.

Важной особенностью в работе щековых дробилок, является их способность под воздействием вибрации арматура отделяется от бетона, что может быть эффективным при переработки железобетонных элементов.

Одним из типов дробильного оборудование для переработки бетонного лома, могут послужить конусные дробилки. На рисунке 3 представлен пример данного типа дробильного оборудования.

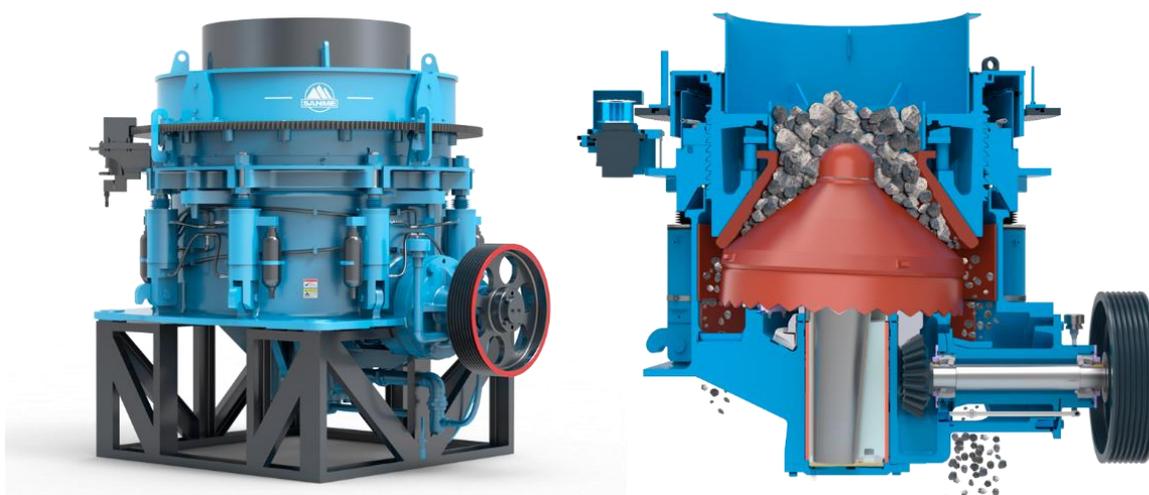


Рисунок 3 – Дробильное оборудование конусного типа

Конусные дробилки разделяются на модели для грубого, среднего и мелкого дробления конечного переработанного продукта, в зависимости от своих габаритов.

В конусной дробилке материал разрушается главным образом за счет давления. Процесс измельчения в конусной дробилке выполняется непрерывно, что позволяет избежать использования крупных маховиков и увеличить время, при котором материал находится внутри камеры дробления. Это позволяет добиться более высокой степени измельчения по сравнению с использованием щековых дробилок.

Данные дробилки первоначально предназначены для дробления материалов с большой, средней и мелкой фракции, за исключением материалов с составной или пластичной структурой.

Рабочие зоны дробилок спланированы для использования их в многоступенчатых процессах. Более того, каждый из типов дробилок может быть использован, учитывая конкретные требования к производимому продукту.

Вторая стадия дробления должна включать в себя использование конусной инерционной дробилки, которая имеет возможность увеличивать выход фракции и 5-10 мм и уменьшать количество растворной части.

Данная система применяет технологию дробления, при которой происходит процесс саморазрушения материала в его слое, при котором материал сжимается с параллельным сдвигом. Этот процесс необходим для того, чтобы дозировать силу влияния на слой материала. Этот способ разрушения значительно повышает эффективность удаления растворной составляющей с поверхности полученного щебня

Для переработки бетонного лома, также возможно рассмотреть дробилки валкового типа. Пример данного вида оборудования для дробления изображен на рисунке 4.

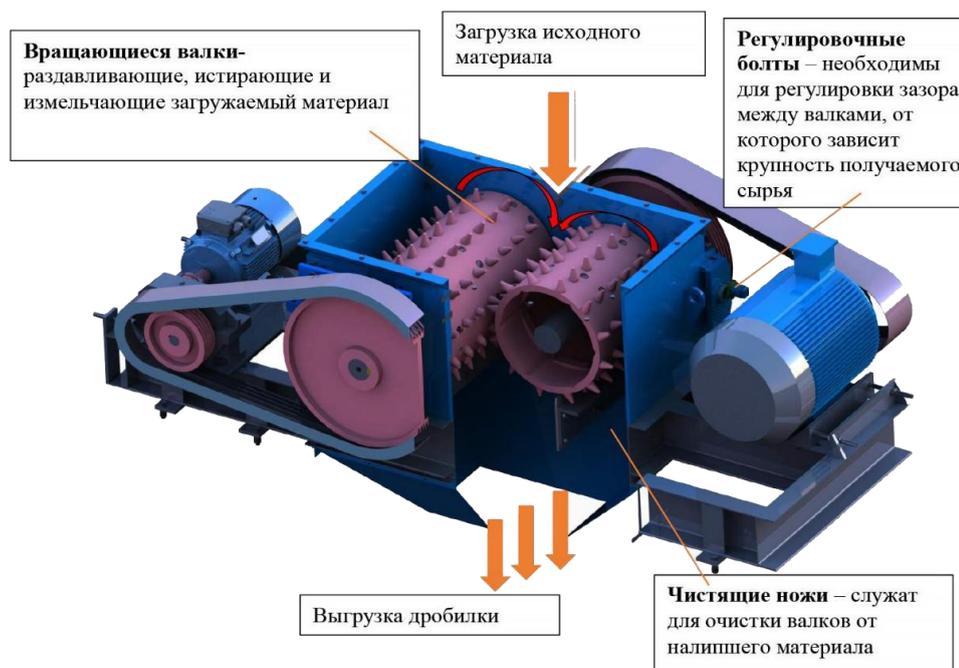


Рисунок 4 – Дробильное оборудование валкового типа

Работа валковых дробилок, при дроблении поступающего материала, основывается на принципе, когда материал поступает между валками и путем прохождения между ними, происходит процесс сжатия материала, что приводит к его разделению на мелкие частицы. Для того чтобы захватить материал, валки должны быть в 20 раз больше по размеру, нежели материал.

Для того чтобы дробить карбонатные горные породы, уголь и известняк часто применяют данный вид дробилок. Однако, в случае необходимости дробления бетонных конструкций, данный тип дробилок, не является оптимальным способом его переработки.

Одним из способов получения бетонного лома является применение дробилок, молоткового и стержневого типа. Вариант данного дробильного оборудования изображен на рисунке 5.



Рисунок 5 – Дробильное оборудование молоткового типа

Молотковые и стержневые дробилки используются для измельчения материалов путем ударного воздействия, они эффективно применяются для

различных материалов, включая уголь, известняк и другие сырьевые продукты, требующие измельчения перед последующими производственными процессами.

Размер обрабатываемого продукта дробления в молотковых дробилках зависит от скорости вращения ротора, типа используемых ножей или ударных пластин, а также от регулировки зазора между ротором и статором.

В молотковых дробилках есть возможность изменять эти параметры, что является преимуществом, так как это допускает настроить процесс максимально под определённую задачу

Стоит также рассмотреть роторные дробилки, в качестве оборудования для дробления бетонного лома. На рисунке 6 представлен вариант данного типа дробильного оборудования.

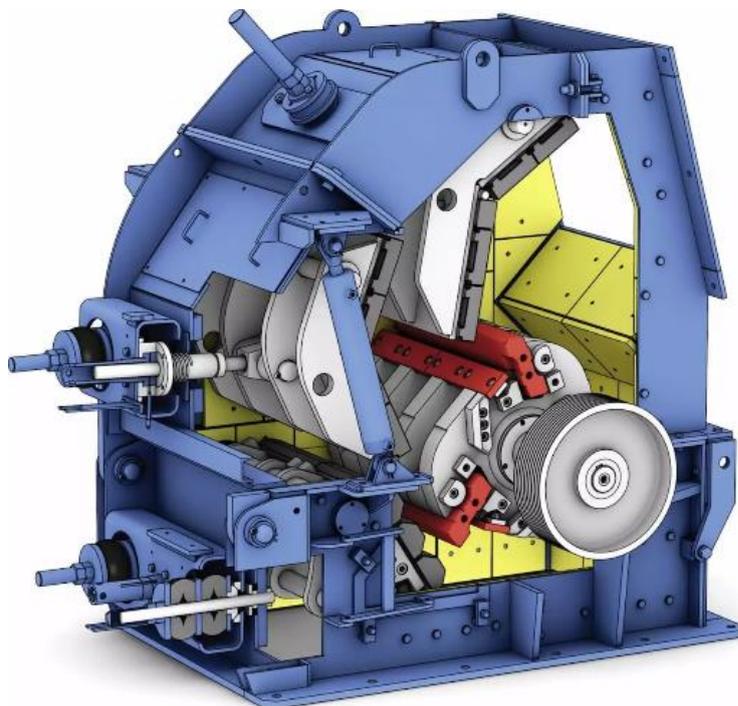


Рисунок 6 – Дробильное оборудование роторного типа

Роторные дробилки используют для измельчения материалов путем воздействия вращающегося ротора на сырье.

При включении дробилки ротор начинает вращаться, что порождает силу, направленную наружу. Сырье направляется в область дробления, где оно подвергается ударам от молотков или пластин, приводя к его измельчению. Получившийся материал проходит через отверстия разгрузочной решетки, определяя итоговый размер продукта

Роторные дробилки широко используются для измельчения разнообразных материалов, включая камень, руду, уголь, строительные материалы и прочие. Они находят применение в горнодобывающей отрасли, строительстве дорог, производстве цемента и других областях.

Эти устройства отличаются высокой эффективностью дробления, а также высокую производительную способность и экономное потребление энергии.

Из представленной информации становится ясно, что помимо роторных дробилок также для того, чтобы измельчить вторичный бетон, можно эффективно использовать щековые дробилки. Несмотря на это, следует анализировать и другие, незатронутые разновидности подобных устройств.

Согласно результатам международных исследований переработки вторичного бетона, было установлено, что существует три основных подхода к производству и использованию вторичного щебня из переработанного бетона в качестве вторичного заполнителя [8].

– После демонтажных работ, полученный бетон направляется на предприятие для последующей переработки. После этого полученный продукт отправляется на объекты строительства или на заводы, которые занимаются производством бетона.

– В местах проведения работ по демонтажу осуществляется, процесс получения заполнителей на основе получаемого бетонного лома, которые затем перемещаются на объекты, занимающиеся изготовлением бетона или же на строящиеся объекты.

– Как и прежде, на месте проведения демонтажных работ,

производится и сразу применяется полученный заполнитель.

На рисунке 7 продемонстрирована данная схема организации производства.

Стоит также отметить, что оборудование для обработки бетона, на месте проведения демонтажных работ, может быть представлено от способа установки в виде стационарного или разборного варианта, что также подразумевает, больше обращать внимание на применение заполнителей непосредственно на месте проведения демонтажных работ.

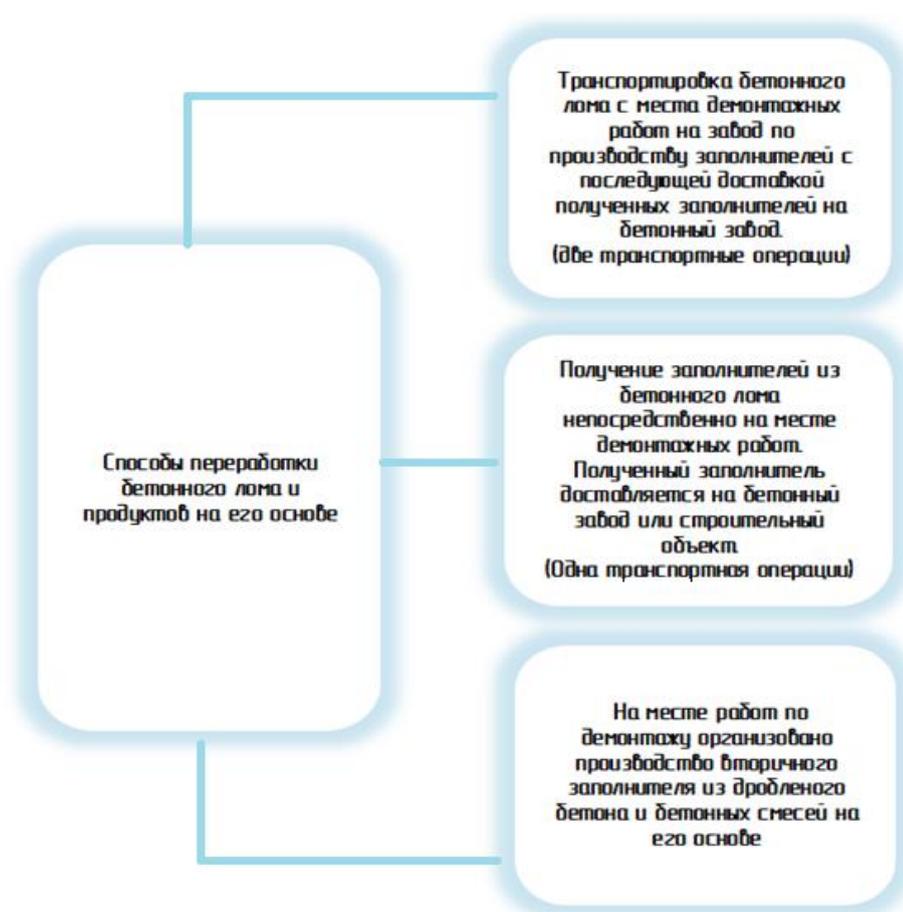


Рисунок 7 – Организация производства и применения вторичного заполнителя из бетонного лома

На рисунке 8 показаны процессы, которые направлены на переработку бетона. Первоначально отходы из бетона проходят необходимые процессы

переработки. Далее достигается состояние, при котором получаемый щебень может быть использован без применения дополнительных тех. процессов и используется в качестве элемента дорожного покрытия [49].

При использовании переработанного бетона в виде щебня, гравия, песка, необходимо включение дополнительных процессов. Это может означать добавление дополнительных компонентов или процессов в следствии которых происходят изменение первоначальной структуры материала.

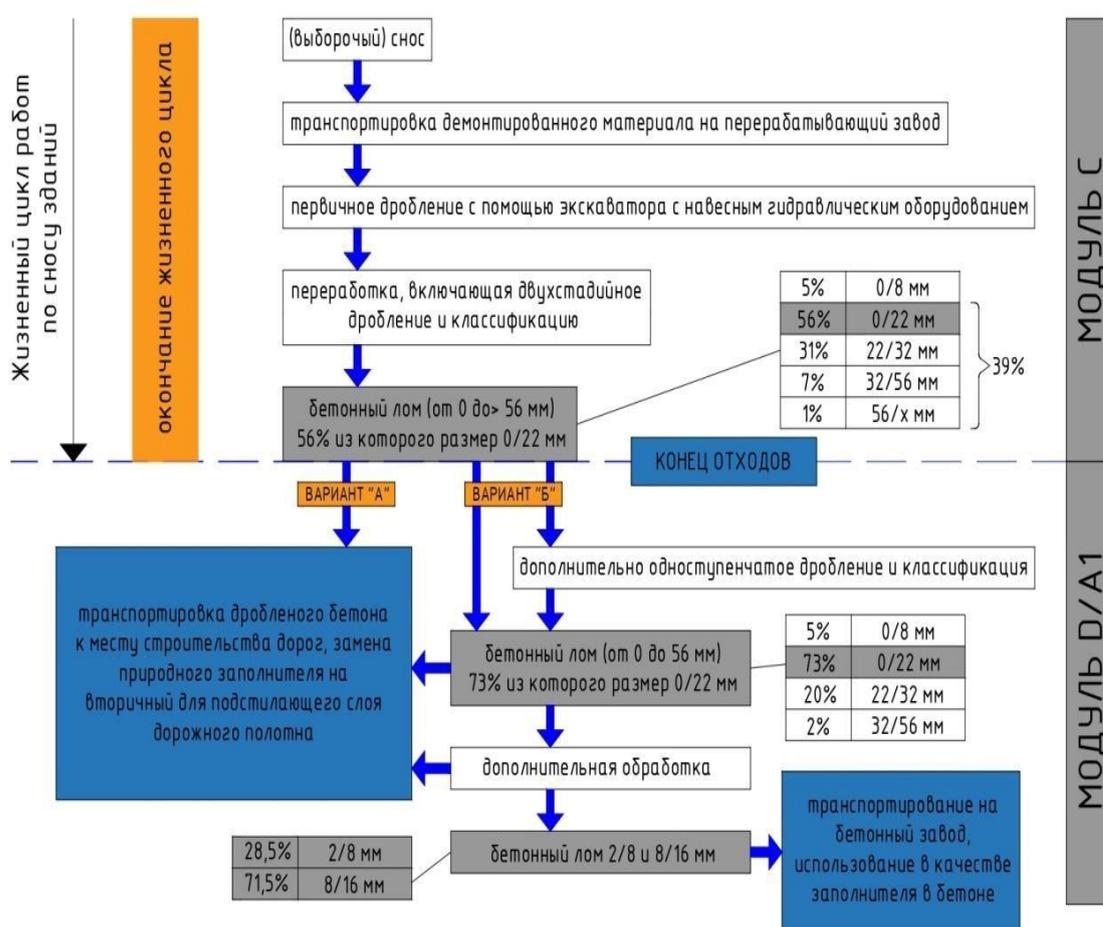


Рисунок 8 – Процессы переработки бетона

Компании, занимающиеся переработкой боя бетона, прибегают к применению специализированного дробильно-сортировочного оборудования. Это связано с тем, что такое оборудование способно

эффективно перерабатывать большие объемы материалов и получать высококачественную продукцию.

Для дробления бетона на начальном этапе можно использовать навесное оборудование, установленное на гусеничных или колесных мобильных строительных машинах.

При дроблении бетонного лома первичными продуктами являются щебень различных фракций. Размер фракций зависят от технологии переработки и используемой установки.

Среди компаний, которые производят дробильно-сортировочное оборудование в России можно отметить такие компании, как:

ООО «Тульские машины» имеет более чем 80-летний опыт работы в области проектирования и производства технологического оборудования для различных отраслей промышленности. Компания выпускает широкий спектр продукции, включая различные типы дробилок, грохотов, конвейеров и другое оборудование.

ООО Завод «ДСМ-групп» занимается производством дробильно-сортировочного оборудования для переработки крупных объемов материалов. Компания выпускает дробилки различных типов и модификаций, а также грохоты и конвейеры.

ООО «Канмаш ДСО» является производителем оборудования для дробления, сортировки и переработки различных материалов, включая железобетон. Компания выпускает разнообразные дробилки, грохоты и конвейеры с учетом индивидуальных потребностей заказчиков.

ЗАО «Дробмаш» занимается разработкой и производством грохотов и дробильных установок, которые используются для переработки различных материалов. Компания предлагает широкий выбор оборудования различной мощности и производительности.

Каждая из этих компаний имеет свои особенности и предлагает широкий ассортимент дробильно-сортировочного оборудования различных типов и модификаций, что позволяет подобрать наиболее подходящий

вариант для конкретных задач и требований заказчиков.

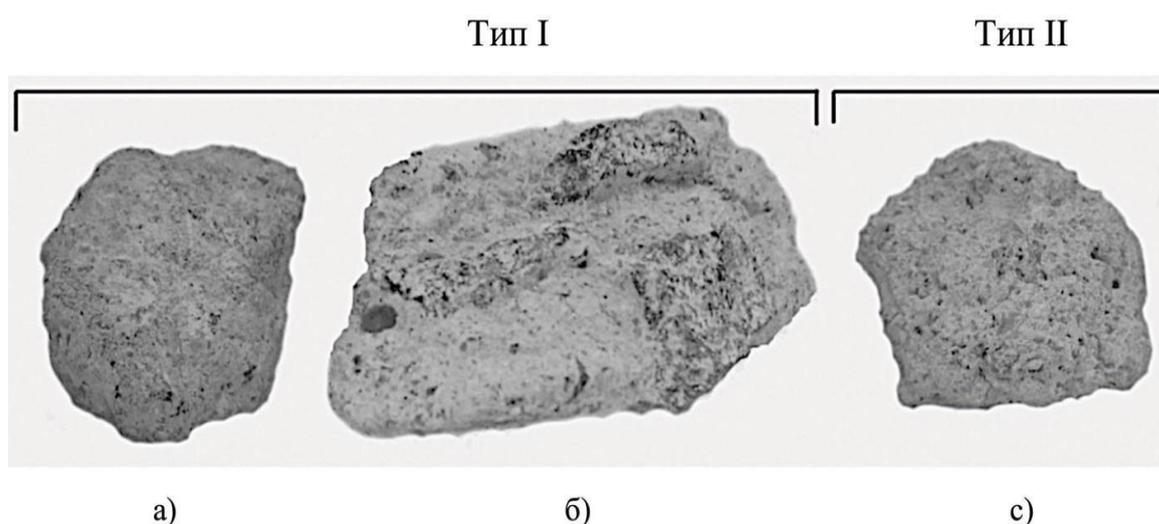
Для получения качественных строительных материалов следует соблюдать определенные закономерности, с соблюдением состава и рецептуры, также возможно использование математической модели, которая способна подробно описать структуру материала при этом учитывая определенные закономерности [6].

1.4 Способы повышения качества заполнителей на основе бетонного лома.

Полученный продукт, вследствие прохождения ряда стадий дробления, по заявлению автора [46], следует классифицировать на следующие виды:

1. Класс заполнителя, представляет собой изначальный щебень, покрытый цементным раствором.
2. Классом заполнителя является, заполнитель, который состоит только из растворной части.

На рисунке 9 продемонстрированы данные виды заполнителей, подразделенных по своему классу.



Шкалы: а, б) Заполнитель 1-го класса, изначальный щебень, покрытый цементным раствором, в) Заполнитель 2-го класса, состоящий только из растворной части

Рисунок 9 – Классификация вторичного заполнителя

На предприятиях занимающихся переработкой отходов из бетона существует проблема, наличия раствора на окончательном продукте дробления. Несмотря на то, что имеются способы удаления раствора, некоторые из них могут быть неэффективными или приводить к нежелательным последствиям.

В исследовании авторов [31] говорится, что процентная составляющая растворной части, налипшей на вторичный щебень, может быть достаточно велика и может достигать 39%.

Из содержания исследования [42] стоит заметить, что содержание растворной части на щебне, не зависит от изначальной фракции щебня и на фракциях 10-20, 20-40 мм, количество раствора является идентичным, однако на щебне меньшей фракции количество раствора может быть больше.

В исследовании Коровкина М.О. говорится, что «для повышения характеристик заполнителя может быть использовано многостадийное измельчение бетонного лома по «мягкому» режиму в обычных щековых дробилках. Для обеспечения такого режима разгрузочное отверстие дробилки должно быть открыто до максимально возможной ширины, а дробление должно вестись при максимальном заполнении рабочего пространства дробилки в режиме «завала». При таком режиме разрушение бетонного лома происходит за счет контактного взаимодействия дробимого материала между собой в отличие от традиционного режима дробления, при котором разрушение материала происходит в результате «жесткого» воздействия на него подвижной щеки дробилки. Измельчение по «мягкому» режиму обеспечивает разрушение преимущественно менее прочных частиц цементного камня и растворной составляющей бетона, а также отделение этих компонентов бетона от зерен крупного заполнителя. В таком режиме степень измельчения материала снижается, поэтому он должен подвергаться двух- или трехкратному дроблению» [29].

«Многостадийное дробление позволяет повысить характеристики заполнителя, однако приводит к образованию большого объема мелких

фракций, состоящих преимущественно из частиц цементного камня. Гранулометрический состав полученного крупного и мелкого заполнителей не позволяет их использовать для производства традиционных бетонов без отсева тонких и мелких фракций. Очевидно, что такая технологическая операция приведет к образованию большого объема материала, который также нельзя использовать в традиционной технологии бетона» [29].

По результатам исследований, было установлено, что эффективность использования вторичного, вяжущего напрямую зависит от заложенных составов бетонов, что подтверждено в ходе исследования. [32].

В процессе проведения данного исследования были получены результаты, которые свидетельствуют, что замена портландцемента вторичным вяжущим, которое было изготовлено из измельченного бетона совместно с использованием суперпластификатора является эффективным вариантом.

Из результатов исследования следует, что замена портландцемента вторичным вяжущим может привести к сокращению расхода цемента. Это указывает на потенциальную перспективу внедрения вторичного вяжущего в качестве замены портландцемента при производстве строительных материалов.

Для повышения качества полученного продукта после дробления, рекомендуется использовать процесс активации.

Исследователи, создающие эффективные строительные материалы, сталкиваются с рядом проблем. Также это относится к созданию рецептов, технологий, составов и других аспектов.

Процесс активации «состоит в разрушении слабых зёрен щебня или удалении остатков цементного камня, что приводит к повышению технических характеристик бетонов за счёт улучшения качества контактной зоны» [40].

Термическая активация — это процесс, в котором используется разница в тепловом расширении материалов, что приводит к удалению

раствора с помощью тепловых напряжений, возникающих в производимом материале.

После определения типа природного заполнителя и степени его прочности, заполнитель разогревается до 600 °С в течение 2 ч. Это необходимо для того, чтобы удалить имеющийся раствор на заполнителе. После нагрева вторичный щебень, просеивают чтобы бы отделить его от раствора [51].

Для улучшения качества продукта рекомендуется предварительно выдерживать вторичный щебень в воде. С помощью этого можно повысить эффективность процесса термической активации. [52].

На рисунке 10 отражены основные этапы процесса термической активации.

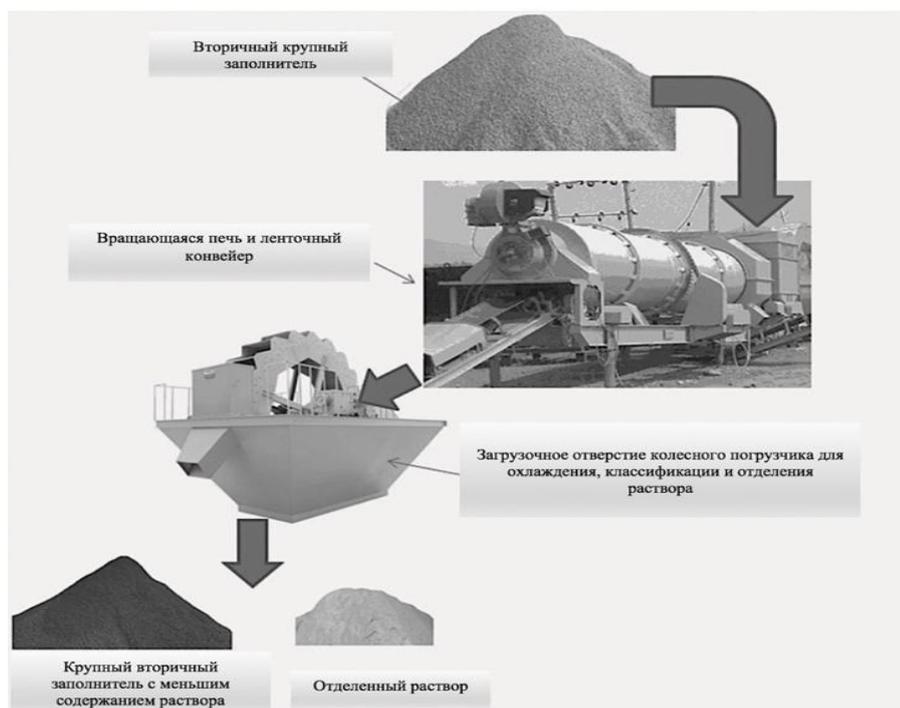


Рисунок 10 – Основные стадии термической активации вторичного заполнителя

В исследовании [24] заполнитель из бетонного лома был подвергнут термической активации. Результатом данного исследования следовало, что в зависимости от бетонного лома возможно получить более прочные бетоны,

после прохождения термической активации.

Существуют свои преимущества и недостатки в использовании метода термической активации. Данный метод имеет ряд преимуществ, которые заключаются в простоте оборудования, которое необходимо для использования. Необходимо учитывать, что существует ряд недостатков данного способа, а именно: высокую энергозатратность, плохую эффективность удаления раствора и длительность обработки, а также возможное негативное влияние нагрева вторичного заполнителя на качество изначального щебня. Это может привести к дополнительным затратам на замену заполнителя после процедуры термической активации или снижению качества продукции.

Метод кислотной активации представляет из себя, уменьшения объема раствора под воздействием кислот. В основе его лежит выдержка в растворах кислот на протяжении 24 часов, с последующей промывкой и просеиванием заполнителя [51].

На рисунке 11 продемонстрирован данный процесс кислотной активации.



Рисунок 11 – Способ кислотной активации вторичного заполнителя

Эффективность данного способа активации выше, но использование, но использование концентрированных кислот может привести к снижению прочности бетона, так как в нем увеличивается содержание сульфатов и хлоридов.

Особенно эффективно применять комбинированный метод химической и механической активации, когда в процессе оттаивания заполнителя в растворе сульфата натрия, следует механическая обработка [45].

Для уменьшения растворной части на заполнителе, также предлагается способ обработки в промышленных микроволновых печах [47], данный способ является достаточно эффективным и способен удалить до половины растворной части, от всего объема.

«Повышение характеристик вторичного щебня обеспечивается за счет постепенного уменьшения содержания во вторичном щебне цементного камня, что подтверждается снижением водопоглощения и повышением плотности вторичного щебня. Кроме того, дробление в 2-3 стадии позволяет снизить межзерновую пустотность щебня за счет улучшения формы зерен, которая характеризовалась в эксперименте средней толщиной зерен» [29].

По результатам исследования [36] следует, что механоактивация бетонной смеси, на основе заполнителей из бетонного лома, способствует получению мелкозернистый бетон с прочностными характеристиками до 35 МПа.

Выводы по главе 1:

– Целесообразно перерабатывать отходы после выполнения демонтажных работ зданий и сооружений. Методом переработки является дробление, с последующем извлечением и арматуры, в результате чего мы должны получить щебень заданной фракций вместе с отсевом дробления.

– В мире имеются значительные знания и практические навыки по использованию переработанного бетона, в качестве сырья для производства,

включая те, которые обладают способностью самоуплотняться. Основным способом использования продуктов дробления является их использование в качестве вторичного наполнителя.

– Наиболее существенным недостатком использования заполнителей из переработанного бетона является наличие окаменевшего раствора в составе, что может отрицательно сказаться на качестве последующего продукта. В отличие от природных заполнителей, щебень из дробленого бетона имеет меньшую плотность и прочность, чем природный материал.

– Применение самоуплотняющегося бетона на основе вторичного заполнителя является менее качественным аналогом в сравнении с природными заполнителями, однако оптимальный подбор щебня и отсева, позволяет получить более качественный продукт. В случае применения этого СУБ появляется возможность увеличения сырьевой базы строительных материалов.

– По результатам исследований, проведенных с использованием научно-технических источников, была выдвинута предположение о возможности получения самоуплотняющихся смесей, которые имеют в качестве заполнителя ранее переработанные бетонные или железобетонные изделия.

– Важно понимать влияние микронаполнителей, которые получены после дробления бетона, их следует применять только, после термомеханической активации.

2 Свойства щебня, песка, полученных путем дробления и отсева бетонного лома и методика исследования

2.1 Характеристики материалов

2.1.1 Гранулометрический состав продукта дробления

Экспериментальные исследования в рамках научно-исследовательской работы проводились в лаборатории «Центра архитектурных, конструктивных решений и организации строительства» ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет».

При создании бетонной смеси с использованием вторичного бетона важно иметь информацию о фракционном составе заполнителей, включая содержание щебня, песка и пылевидной фракции.

Щебень, получен в результате дробления щековой дробилки марки ДМЦ 80х150, с его последующей сортировкой на фракции. На рисунке 12 продемонстрировано данное дробильное оборудование.



Рисунок 12 – Щековая дробилка марки «ДМЦ 80×150»

После сортировки на фракции был получен щебень фракций 10-20 мм и 5-10 мм, оставшаяся доля состояла из смеси песка, частицы размером от 0,16 мм до 5 мм и пыли, частицы размером менее 0,16 мм.

Отсортированные по фракциям, щебень фракции 10-20 мм демонстрируется на рисунке 13, фракции 5-10 мм показан на рисунке 14, песок, полученный в результате дробления проиллюстрирован на рисунке 15 и пылевидная фракция показана на рисунке 16.



Рисунок 13 – Щебень фракции 10-20 мм, полученный в результате дробления



Рисунок 14 – Щебень фракции 5-10 мм, полученный в результате дробления



Рисунок 15 – Песок из отсева дробления, фракции 0,16-5 мм



Рисунок 16 – Пылевидная фракция $<0,16\text{мм}$

В исследовании [50] отмечается, что частицы измельченного бетона размером менее 5 мм ухудшают податливость бетонной смеси. Заметно, что уровень податливости бетонной смеси будет больше в зависимости от количества частиц размером менее 5 мм и соотношения песка к пыли, так как пыль может способствовать увеличению текучести бетонной смеси.

Для более всестороннего изучения гранулометрического состава материалов, полученных в результате измельчения вторичного бетона, и оценки влияния исходной прочности на этот состав, в данном исследовании проведены следующие измерения.

Прямо у места дробления были взяты образцы измельченных материалов бетонов.

Пробы были просеяны с использованием стандартного набора сит для определения фракции, было обнаружено, что в материале после дробления содержание пыли составляет приблизительно 5%.

2.1.2 Свойства щебня, полученного путем дробления и отсева бетонного лома.

В составе щебня из раздробленного бетона присутствуют фракции наполнителя, которые соединены с цементным камнем. Также в его состав входят контактная зона, которая содержит кристаллы портландита и другие кристаллические соединения. Помимо этого, процесс дробления вызывает появление новых химически активных поверхностей, за счет чего поверхность заполнителя становится похожей на гранитные аналоги.

Повторная переработка повышает качество вторичного щебня за счет уменьшения содержания цементного камня, что приводит к снижению водопоглощения и увеличению средней насыпной плотности щебня.

Изучение поверхности зерен щебня вторичного бетона проводилось с помощью визуального наблюдения.

Благодаря визуальным исследованиям удалось обнаружить, что при измельчении щебня, в процессе дробления бетона, разрушение происходит либо по цементно-песчаному составу, либо на поверхности контакта с крупным заполнителем.

В то же время, количество измельченных фракций исходного щебня очень мало. Количество раздробленного щебня, согласно результатам проверки образцов, составило примерно 15% независимо от того, какая фракция щебня использовалась.

При измельчении зерен щебня образуются выступы и углубления на получаемой фракции, которые образуются вследствие контакта с цементно-песчаным камнем.

«При использовании щебня из вторичного бетона в бетонных смесях прочность "нового" бетона будет в значительной мере определяться сцеплением "нового" цементного камня со "старым"» [34].

Содержание кубических зерен в щебне составляет до 40%, при этом, вне зависимости от того, насколько прочен вторичный бетон, наибольшее количество кубических зернышек замечено во фракции размером 5-20 мм.

При визуальном осмотре было обнаружено, что после дробления зерна щебня включают неровности на своей поверхности. Это наблюдение говорит о том, что невозможно с достаточной точностью изложить вид зерен произведённого щебня.

Вследствие появления неровностей на поверхности, зерна щебня обладают более сложной поверхностью по сравнению с "правильной" формой природного щебня. У щебня, состоящего из первичного песчаника, наблюдается минимальное изменение поверхности. Это может быть объяснено свойствами первичной структуры породы. В сравнении со щебнем из песчаника, поверхность гранита обладает более сложной структурой.

Дробление бетона на гранитах, известняках и песчаниках дает возможность получать щебень кубической формы в количестве 38%, а также лещадные зерна с долей до 19%. Эти характеристики можно сравнить с показателями кубовидности и лещадности исходного материала, но при этом для песчаника, данные показатели значительно выше, чем у первичного материала.

В процессе дробления бетона у зерен щебня, получаемых в результате его дробления, возникает более шероховатая текстура, что может повысить сцепление на структурном уровне, в цементно-песчаной смеси [37].

Возрастание шероховатости обусловлено разрушением цементного раствора на поверхности щебня, а также особенностями дробления бетона.

При определении пустотности в щебне, требуется следовать стандартам ГОСТ 8269.0-97. «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний» [20].

Существенное влияние на формирование структуры цементного камня, оказывает щебень, из бетонного лома. В работе [5] утверждается, что процесс формирования бетона происходит при низком водосодержании, тем самым обладает повышенной водопотребностью.

Проведенные измерения показали, что плотность пустотности щебня

из бетона составляет около 0,47, этот параметр практически не зависит от размера фракции и формы щебня, а также от типа исходного вторичного заполнителя.

2.1.3 Свойства песка, полученного путем дробления и отсева бетонного лома.

Технологические свойства бетона и его технические характеристики напрямую зависят от данных параметров: гранулометрический состав, модуль крупности песка, водопотребность.

При проведении испытаний с песком были применены требования по ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия» [22] и ГОСТ 8735-88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний» [21].

Чтобы получить гранулометрический состав, использовали метод просеивания с использованием стандартного набора сит. На рисунке 17 показан используемый в работе стандартный набор сит.



Рисунок 17 – Стандартного набора сит фр. 0,16-5мм

Результаты испытаний, показанные ниже (Таблица 2) показали следующее, песок из отсева дробления. По своей величине и значению модулю крупности принадлежит к классу крупных песков, что подтверждается таблицей. 1 ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия» [22]. Полный остаток на сите с сеткой 0,63 соответствует таблице 2 ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия» [22], следовательно, исходная прочность вторичного бетона незначительно влияет на гранулометрический состав, полученных в результате дробления.

Прочность исходного бетона также не существенно влияет на средние значения истинной и насыпной плотности песка

2.2 Характеристики применяемых материалов

2.2.1 Портландцемент

«Портландцемент — гидравлическое вяжущее вещество, получаемое путём совместного помола цементного клинкера, гипса и добавок, в составе которого преобладают силикаты кальция (70—80 %). Это вид цемента, наиболее широко применяемый во всех странах» [39].

С целью проведения эксперимента, был выбран портландцемент ЦЕМ I42,5Н марки "Вольский цемент". ГОСТ 31108 – 2020 «Цементы общестроительные. Технические условия» и ГОСТ 30515 – 2013 «Цементы. Общие технические условия» [16].

«Для получения портландцемента с заданными специальными свойствами используют следующие основные пути:

- 1) регулирование минерального состава и структуры цементного клинкера, оказывающее решающее влияние на все строительно-технические свойства цемента;

- 2) введение минеральных и органических добавок, позволяющих направленно изменять свойства вяжущего, экономить клинкер, уменьшать расход цемента в бетоне;

3) регулирование тонкости помола и зернового состава цемента, влияющих на скорость твердения, активность, тепловыделение и другие свойства цемента» [3].

Нормально твердеющий портландцемент – разновидность цемента, который позволяет быстро достичь оптимальной прочности и твердости в процессе затвердевания. Он обладает способностью превращаться в прочный материал с высокой степенью прочности и стойкости к долговременному воздействию различных факторов. Такой цемент часто используется в строительстве для быстрого и надежного создания прочных конструкций и элементов.

На рисунке 18 проиллюстрирован применяемый в работе портландцемент.



Рисунок 18 – Портландцемент торговой марки «Вольский цемент»

Этот цемент имеет нормальную плотность цементного теста в размере 26,5%, время начала схватывания 180 минут, время конца схватывания 235 минут.

Прочность на сжатие данного цемента при возрасте 28 суток составляет 42,5 МПа.

В таблице 1 приведены характеристики портландцемента ЦЕМ I42,5Н марки «Вольский цемент» с учетом химического и минералогического состава клинкера.

Таблица 1 – Характеристики используемого портландцемента ЦЕМ I42,5Н

Наименование		Фактическое значение
Показатель предела прочности при сжатии, МПа	на 2 сутки	10-20
	на 28 сутки	42,5-62,5
Удельная поверхность, м ² /кг		400
Время до начала схватывания, мин		180
Время конца схватывания, мин		235
Тонкость помола, %		97,2
Содержание вспомогательных компонентов, %		3,3
Химический состав клинкера, в %		
Al ₂ O ₃		5,15
SiO ₂		23,1
Fe ₂ O ₃		4,39
CaO		64,9
MgO		1,19
Na ₂ O		0,78
SO ₃		0,49
Минералогический состав клинкера (расчетный), %		
C ₂ S		17,4
C ₃ S		62,4
C ₃ A		6,8
C ₄ AF		13,4

Клинкер, который используется для приготовления цементного раствора, состоит из алита и белита, которые составляют более чем 67% его массы. При этом соотношение оксида кальция к оксиду кремния не менее 2,0, а также, в клинкере содержится не более 5,0% оксида магния.

2.2.2 Мелкий заполнитель

Испытания проводились с использованием трех видов мелкого заполнителя. Это были естественные пески "Волжские пески", "Камские пески" и песок, полученный в результате отсева дробления.

Пески были отобраны с учетом требований, установленных ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия» [22].

Показатели гранулометрического состава песка представлены в таблице 2, а также на рисунке 19 представлена кривая, которая показывает последовательность процесса просеивания песка.

Таблица 2 – Гранулометрический состав песка

Наименование заполнителя	Размер сита, мм	Частный остаток, %	Полный остаток, %	Модуль крупности $M_{кр}$
«Камский песок»	10	0,2	-	3,46 (Песок повышенной крупности)
	5	8,7	8,9	
	2,5	22,4	31,3	
	1,25	16,6	47,9	
	0,63	11,1	59	
	0,315	40,5	99,5	
	0,16	0,2	99,7	
	< 0,16	0,3	100	
«Волжский песок»	10	-	-	1,31 (Песок мелкий)
	5	-	-	
	2,5	0,3	-	
	1,25	0,5	0,8	
	0,63	1,5	2,3	
	0,315	28,6	30,9	
	0,16	66,3	97,2	
	< 0,16	2,8	100	

Продолжение таблицы 2

Наименование заполнителя	Размер сита, мм	Частный остаток, %	Полный остаток, %	Модуль крупности $M_{кр}$
Песок из отсева дробления	10	-	-	2,99 (Песок крупный)
	5	-	-	
	2,5	32	-	
	1,25	22	54	
	0,63	10	64	
	0,315	26	90	
	0,16	1	91	
	< 0,16	9	100	

Модуль крупности Камского песка равен:

$$M_{кр} = \frac{8,9+31,3+47,9+59+99,5+99,7}{100} = 3,463 \text{ мм} \quad (1)$$

Модуль крупности Волжского песка равен:

$$M_{кр} = \frac{0,8+2,3+30,9+97,2}{100} = 1,312 \text{ мм} \quad (2)$$

Модуль крупности песка из отсева дробления равен:

$$M_{кр} = \frac{54+64+90+91}{100} = 2,99 \text{ мм} \quad (3)$$

В соответствии с таблицей 1 ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия» [22], пески по модулю крупности делятся на следующие группы:

- «Камский песок» к группе повышенной крупности;
- «Волжский песок» к мелким пескам;
- Песок из отсева дробления к группе крупных песков

В соответствии со стандартом вышеуказанного ГОСТа, полный остаток на сетке с ячейкой 0,63 соответствует таблице 2.

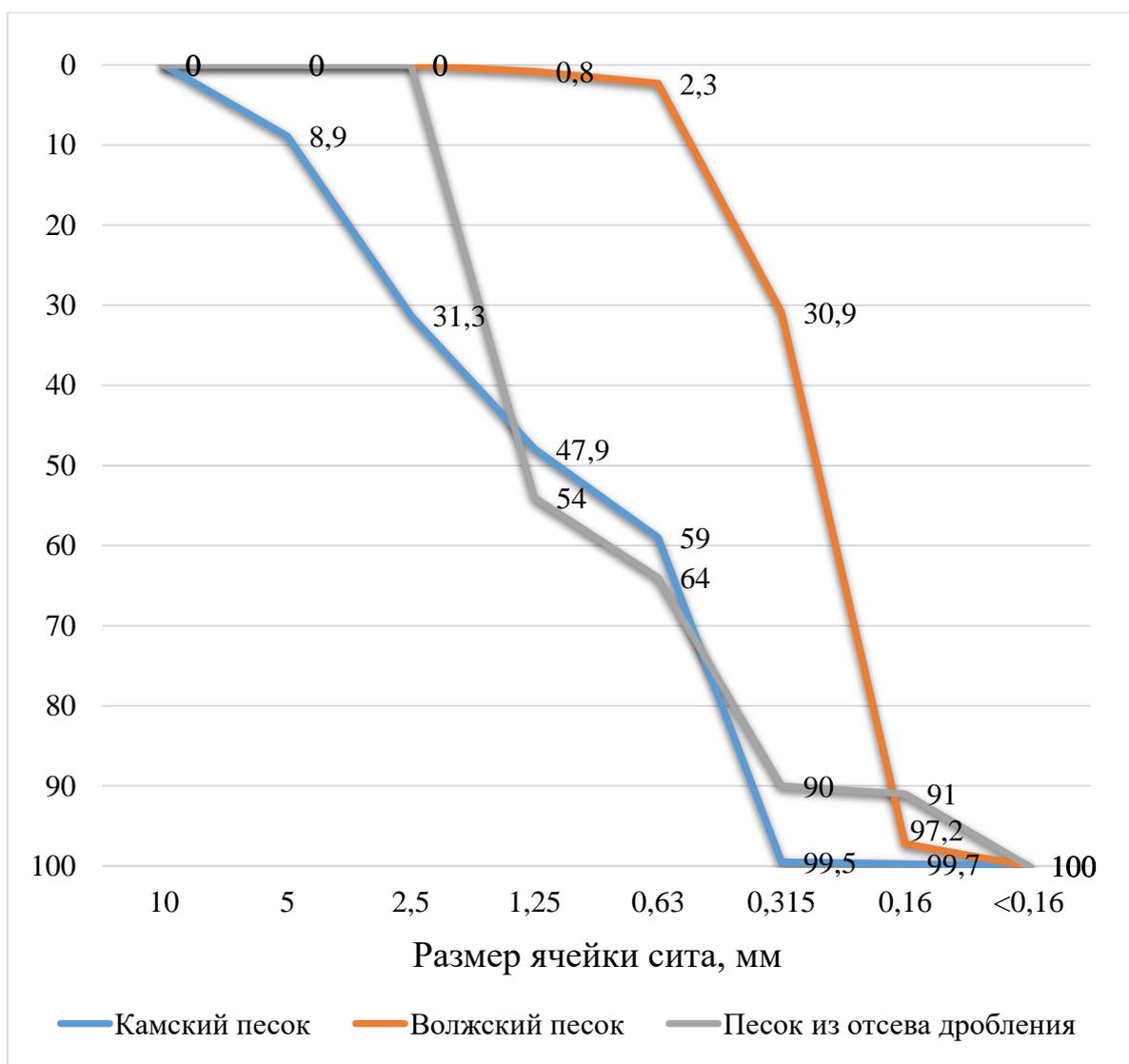


Рисунок 19 – Кривая просеивания песка

Таблица 3 содержит информацию о насыпной плотности песка Волжского, Камского, песка из отсева дробления.

Таблица 3 – Насыпная плотность мелкого заполнителя

Наименование	«Камский песок»	«Волжский песок»	Песок из отсева дробления
Насыпная плотность кг/м ³	1470	1562	1250

2.2.3 Крупный заполнитель

«В качестве крупного заполнителя для бетона применяют гравий, щебень и щебень из гравия с размером зерен 5-70 мм. Качество крупного заполнителя определяется минеральным составом и свойствами исходной породы (ее прочностью и морозостойкостью), зерновым составом заполнителя; формой зерен и содержанием вредных примесей» [3].

В работе было использовано три разновидности крупного заполнителя, а именно: из гранитных пород, продемонстрирован на рисунке 20, карбонатные породы, показан на рисунке 21 и щебень из отсева дробления бетона проиллюстрирован на рисунке 22.

Щебень фракции 5-10 мм отвечает нормам ГОСТ 8267–93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия» [19].



Рисунок 20 – Щебень гранитных пород фракции 5-10 мм



Рисунок 21 – Щебень карбонатных пород фракции 5-10 мм



Рисунок 22 – Щебень из отсева дробления бетона фракции 5-10 мм

Марка по дробимости определялась согласно стандарту ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия».

Проба щебня укладывается в цилиндр так, чтобы после выравнивания его уровень оставался приблизительно на 1,5 см ниже верхнего края, после вводится плунжер так, чтобы его плоская поверхность была выровнена с верхним краем цилиндра. На рисунке 23 показан цилиндр с пробой щебня и подготовленный к последующим испытаниям.



Рисунок 23 – Цилиндр с подготовленной пробой щебня.

Во время испытания, сила нажатия прессы постепенно увеличивается на 1-2 кН в секунду, достигая при испытании щебня значения 50 кН.

Процесс испытания щебня на гидравлическом прессе продемонстрирован на рисунке 24.



Рисунок 24 – Цилиндр, размещенный в гидравлическом прессе марки «ПГ-50»

Вслед за сжатием образца, из цилиндра извлекается содержимое и производится его взвешивание, после чего образец проходит через контрольное сито с размером ячеек 1,25 мм, которая предназначена для щебня фракции 5-10 мм.

После проведения испытаний, необходимо определить потерю массы.

Она будет определена как дробимость, для этого нужно воспользоваться следующей формулой:

$$D_p = 100 * \frac{(m-m_1)}{m} \quad (4)$$

где m - масса испытываемой пробы щебня (гравия), г;

m_1 - масса остатка на контрольном сите после просеивания раздробленной в цилиндре пробы щебня (гравия), г

$$D_p = 100 * \frac{(400-350)}{400} = 12,5 \quad (5)$$

Затем следует маркировка по дробимости, которая представлена в соответствии с таблицей 4 ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия»

Марка по дробимости в цилиндре вышеуказанных крупных заполнителей приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Марка по дробимости крупного заполнителя в цилиндре.

Наименование	Марка по дробимости
Щебень карбонатных пород	M600
Щебень гранитных пород	M1200
Щебень из отсева дробления	M800

2.2.4 Химические добавки.

В данной работе использовались химические добавки, был включен суперпластификатор от компании «Axton» (Россия). На рисунке 25 демонстрируется используемый в работе суперпластификатор.



Рисунок 25 – Суперпластификатор от компании «Axton» (Россия).

«Пластификаторы — это поверхностно-активная добавка, добавляемая в строительные растворы и бетонные смеси (0,15...0,3 % от массы вяжущего вещества) для облегчения укладки в форму и снижения содержания воды» [38].

«Добавление пластификатора улучшает большинство характеристик затвердевшей смеси, а также позволяет снизить расход цемента, уменьшить энергозатраты при вибрировании бетона (самоуплотняющиеся смеси) или разравнивании стяжек (наливные самовыравнивающиеся смеси для полов)» [38].

Эта добавка представляет собой эффективное средство, которое

позволяет получить более подвижные бетонные смеси с высокой степенью удобоукладываемости.

Добавка была применена для производства самоуплотняющейся бетонной смеси высокого качества.

Технические характеристики суперпластификатора «Axton»

- Плотность = 1,13-1,19 (при +20°C);

- Показатель pH = 4,0 – 7,0;

- Рекомендуемая дозировка от производителя = 0,6 – 1,0 литра на 100 кг цемента (зависит от качества исходных материалов и требований по подвижности смеси).

Применение суперпластификатора, также способствует, сохранить бетонную смесь в течении большего времени, что хорошо отражается при доставке растворов, на место проведения работ [28].

2.2.5 Применяемые микронаполнители.

Дополнительно в работе были применены микронаполнители а именно: высокоактивный микрокремнезем, высокоактивный метакаолин.

«Микрокремнезем — представляет собой ультрадисперсный материал, состоящий из частиц сферической формы, получаемый в процессе газоочистки технологических электродуговых печей при производстве кремния и ферросилиция. Основным компонентом материала является диоксид кремния аморфной модификации. Микрокремнезем является важнейшим компонентом при производстве бетонов с высокими эксплуатационными свойствами» [33].

Микрокремнезем – является эффективной минеральной добавкой для цемента и бетона, производится в результате плавления кремниевых сплавов (например, ферросилиция). На рисунке 26 представлен используемый в работе микронаполнитель высокоактивный микрокремнезем



Рисунок 26 – Микронаполнитель высокоактивный микрокремнезем

«Микрокремнезем обладает пуццолановой активностью, поэтому применяется как эффективная добавка в цементы и бетоны. По ГОСТ Р 56196-2014 относится к техногенным минеральным добавкам. Требования к микрокремнезему приведены в ГОСТ Р 56178-2014» [33]

Применение микрокремнезема способствует увеличению долговечности жидких растворов, упрощает процесс перекачивания смеси и повышает устойчивость к коррозии. В результате использования данной добавки достигаются высочайшие показатели прочности для различных типов бетона, включая высокопрочный бетон, легкий бетон, торкретбетон и бетон с сниженной водопроницаемостью.

Микрокремнезем представляет собой универсальную добавку для цемента и бетона, широко используемую в производстве различных строительных материалов. Благодаря своим качествам, это вещество находит применение в изготовлении сухих строительных смесей, различных видов бетона, пенобетона, цемента, керамики, облицовочных материалов.

Микрокремнезем применяется специально для создания бетонов с высокой прочностью. Этот эффект достигается благодаря заполнению промежутков между частицами цемента микрокремнеземом, обеспечивая значительно лучшее сцепление по сравнению с другими минеральными добавками, такими как котельный и доменный шлак, цеолитовый туф.

Микрокремнезем представляет собой высокореакционный пуццолан, который способствует созданию цементного материала с повышенной стойкостью и прочностью. В реальных условиях использования 1 килограмм микрокремнезема может обеспечить прочностью что и 4-5 килограмма портландцемента. что приводит к улучшению различных характеристик бетона, включая сцепление и прочность на сжатие, химическая стойкость, морозостойкость, износостойкость, и значительно снижает проницаемость. В конечном случае микрокремнезем способствует продлению срока службы бетонных конструкций.

Метакаолин – это высокоактивная пуццолановая добавка, которая используется для улучшения свойств бетона. На рисунке 27 демонстрируется примененный в работе высокоактивный метакаолин.



Рисунок 27 – Микронаполнитель высокоактивный метакаолин

Процесс получения метакАОлина включает в себя обработку природного каолина высокой температурой, около 600-800 градусов С. Этот процесс, известный как кальцинирование, приводит к изменению структуры каолина и созданию метакАОлиновых частиц с новыми свойствами. Полученный метакАОлин широко используется в строительной промышленности благодаря своим связывающим и укрепляющим свойствам.

МетакАОлин повышает прочность бетона за счет улучшения связи между цементом и заполнителем, что приводит к улучшенной долговечности и стойкости конструкции

Добавление метакАОлина может снизить пористость бетона, что способствует уменьшению проницаемости и повышению стойкости к атмосферным воздействиям.

МетакАОлин улучшает работоспособность с бетонной смесью, повышая ее пластичность и удельную работу. Это может быть полезно при использовании бетона в сложных формах.

Благодаря своей реактивности и структурным изменениям, метакАОлин помогает улучшить стойкость бетона к агрессивным химическим средам, таким как кислоты или соли.

Несмотря на это, важно грамотно дозировать метакАОлин и учитывать его взаимодействие с остальными составляющими бетонной смеси для того, чтобы достичь оптимальных результатов в процессе приготовления бетона.

В случае использования метакАОлина для подготовки бетонной смеси, происходит процесс его уплотнения. Это способствует созданию более прочной структуры цементного камня в бетоне. Следуя этой причине, результат можно объяснить тем, что метакАОлин имеет размер в несколько раз меньше размера цемента. Это приводит к тому, что возникает эффект "микробетона", это значит, что минеральные добавки заполняют собой пространство между частичками цемента и взаимодействуют с ними химически.

После взаимодействия компонентов цемента и метаксаолина, происходит процесс уплотнения структуры гидратированных соединений, которые образуются в процессе отвердевания бетона. Это способствует значительному увеличению плотности бетона, водопотребности, коррозионной стойкости и позволяет обеспечить более продолжительный срок эксплуатации как самого бетона, так и конструкции, на его основе.

2.3 Методика проведения исследований и применяемое оборудование.

Перед тем, как приступить к испытанию, бетонные образцы подвергались измерениям и взвешиваниям с допустимой погрешностью не более 0,1%. Образцы бетонов были помещены в условия, при которых температура не превышала 20°C и влажность воздуха не превышала 95%.

Прочность бетона определялась в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Образец должен нагружаться плавно, при постоянной скорости и с нарастанием нагрузки, которая должна довести его до полного разрушения, при этом максимально возможное значение усилия определяет разрушающую силу.

Показатель прочности при сжатии рассчитывается по формуле:

$$R_{сж} = \frac{P}{F} \cdot a, \quad (6)$$

где P – разрушающая сила, кг;

F – площадь поперечного сечения образца, см²;

a – масштабный коэффициент.

Масштабный коэффициент равен 0,85 для куба с размером ребра в 70 мм.

В целях определения плотности щебня, который состоит из боя бетона, был использован метод гидростатического взвешивания. В основе его лежит определение средней пробы зерен, по стандарту ГОСТ 8269.0-97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного

производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний» [20].

Согласно ГОСТ 10181-2014 «Смеси бетонные. Методы испытаний», использовались для определения средней плотности смеси. «Пористость бетонной смеси оценивают следующими показателями: объемом воздуха или газа, содержащегося в уплотненной бетонной смеси, и объемом межзерновых пустот» [10].

В соответствии с ГОСТ 10180 – 2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам», должен быть установлен предел прочности на осевое растяжение при изгибе образцов бетона.

Перед началом испытаний была осуществлена подготовка бетонных образцов в соответствии с ГОСТ 10180 – 2012 а именно:

«В помещении для испытания образцов поддерживалась температура $(20\pm 5)^\circ\text{C}$ и с относительной влажностью воздуха не менее 55%. Образцы выдерживались до испытания при указанных условиях, в распалубленном виде в течение 4 ч при твердении в воздушно-влажностных условиях» [9].

«Перед испытанием образцы подвергались визуальному осмотру, устанавливая наличие дефектов в виде трещин, сколов ребер, раковин и инородных включений» [9].

Показатели определяли на образцах призматической формы размерами $40\times 40\times 160$ мм, с погрешностью в размерах не более 0,1%

Призма устанавливается в пресс и нагружается до разрушения при постоянно нарастающей нагрузке $(0,05 \pm 0,01)$ Мпа/с.

$$R_{tb} = \frac{F \cdot L}{a \cdot b^2}, \quad (7)$$

где F – разрушающая нагрузка, Н;

a, b – ширина, высота поперечного сечения призмы, мм;

L – расстояние между опорами соответственно при испытании образцов на растяжение при изгибе, мм.

В соответствии с ГОСТ 12730.3-2020 «Бетоны. Метод определения водопоглощения» и общими требованиями ГОСТ 12730.0-2020 «Бетоны.

Общие требования к методам определения плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости» [11], должно быть определено водопоглощение образцов бетона.

Перед испытанием необходимо: «очистить поверхность образцов от пыли, грязи и следов смазки с помощью проволочной щетки или абразивного камня» [13], после того, как образцы были подготовлены и взвешены, их помещают в сушильный шкаф, где температура поддерживается на уровне 105°С, при этом изменения температуры на 5 °С могут быть произведены в сторону увеличения или уменьшения.

Высушивание образцов должны проводится также в соответствии с ГОСТ 12730.2-2020 «Бетоны. Метод определения влажности» [12].

Чтобы определить уровень водопоглощения образцов, их помещают в емкость с водой. При этом следует учитывать, что уровень воды в емкости должен быть выше уровня образцов примерно на 50 мм. В емкости должна поддерживаться температура воды в пределах 20 °С, при этом изменения температуры в сторону увеличения или уменьшения не должно превышать 2°С.

Через каждые 24 часа необходимо проводить взвешивание образцов. Это можно сделать с помощью обычных или гидростатических весов. При проведении взвешивания на стандартных весах образцы бетона, которые были извлечены из воды, предварительно протираются влажной тканью. Следует учитывать, что масса воды, вытекшей из пор образца на чашку весов, должна быть включена в массу насыщенного образца. Необходимо проводить испытания, пока результаты двух последовательных взвешиваний не будут иметь разницу более 0,1%.

Водопоглощение бетона по массе в % определяют по формуле:

$$W_M = \frac{m_c - m_B}{m_c}, \quad (8)$$

где m_c – масса образца в сухом состоянии, г;

m_B – масса образца во влажном состоянии, г.

Водопоглощение по объему в % определяют по формуле:

$$W_0 = \frac{W_m \cdot \rho_0}{\rho_B}, \quad (9)$$

где ρ_0 – плотность бетона в сухом состоянии, кг/м³;

ρ_B – плотность воды, принимаемая 1 г/см³.

Также следует определить пористость бетонных образцов согласно нормам ГОСТ 12730.4 – 2020 «Бетоны. Методы определения параметров пористости» [14].

Полный объем пор в % определяют по формуле:

$$P_{\Pi} = \left(\frac{\rho_B - \rho_0}{\rho_B} \right) \cdot 100, \quad (10)$$

где ρ_B – плотность измельченного в порошок бетона, определенная при помощи пикнометра;

Показатель истинной плотности образца определяют путем измерения массы единицы объема измельченного высушенного материала, это также описывается в исследовании [1].

ρ_0 – плотность сухого бетона.

Объем открытых капиллярных пор бетона в % определяют по формуле:

$$P_0 = W_0, \quad (11)$$

где, W_0 – водопоглощение по объему бетона, %.

Выводы по главе 2:

– Для проведения анализа и изучения самоуплотняющейся бетонной смеси и полученных на основе вторичных заполнителей бетонов, были использованы стандартные научно-обоснованные методики.

– Были установлены основные методы и изучены свойства материалов, которые используются в экспериментах.

– Для упрощения вычислений и более быстрой обработки данных необходимо использовать современное программное обеспечение.

3 Самоуплотняющийся бетон из продукта дробления бетонного лома.

3.1 Использование щебня из дроблёного бетона в качестве крупного заполнителя

Для проведения исследования были использованы бетонные образцы, призм изготовленные из бетонов классов В15-25. Измельчение образцов бетона дало возможность получить фракции, размером 5-10; 10-20 мм и мелкозернистой фракции виде отсева песка с цементом.

После отсева дробленой массы получено в процентном соотношении: фракция 10-20 мм 5% заполнителя, 5-10 мм 50% и пылевидная фракция равная 45% от общего объема отсева. Рисунок 28 наглядно демонстрирует, полученный сев дробления по фракциям.

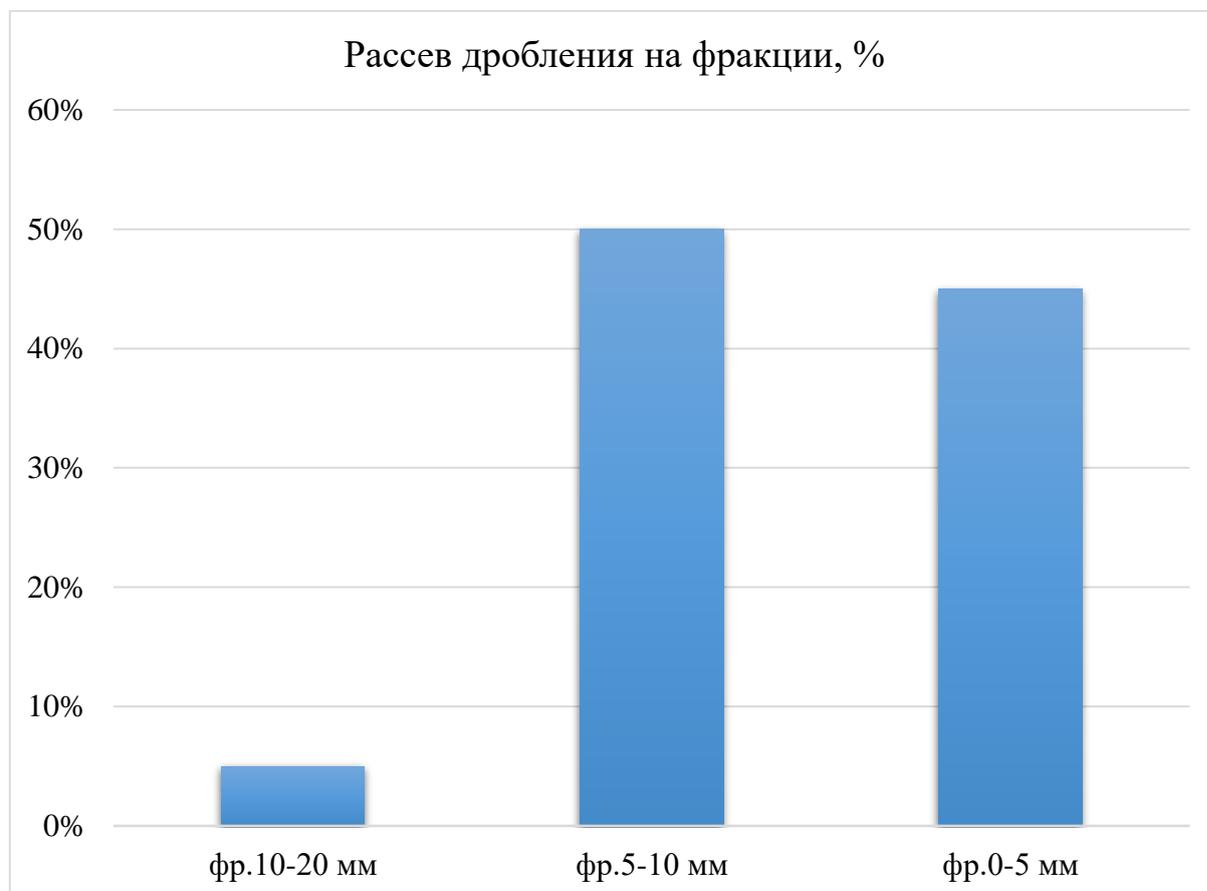


Рисунок 28 – Рассев дробления на фракции от общего объема, %

Среди фракций можно выделить фрагменты зёрен гранитного щебня, небольшие частицы цементного камня.

С помощью анализа данных исследования было установлено, что при измельчении бетона можно получить щебень, сопоставимый с гранитом по своим характеристикам и имеющий возможность быть в качестве компонента в бетонных смесях. [25]

В дробленом щебне фракции 5-10 мм присутствуют три основных вида, зерен, которые определяют его характеристики.

Зерно состоит из трех компонентов: крупного заполнителя, контактной зоны и цементного раствора, который прилипает к исходному крупному заполнителю. Контактная зона является наиболее уязвимым элементом данной системы, так как она обладает повышенной пористостью и вследствие имеет наименьшую прочность.

В случае если в составе зерна присутствует только цементно-песчаный раствор, его прочность зависит только от количества песка и активности цемента, то данные зерна имеют однородную пористую структуру с высокой водопоглощаемостью и низкой прочностью.

Существуют дробленые частицы, которые изначально являются крупными заполнителями, но имеют острые углы и сколы. Причиной возникновения данных явлений является процесс измельчения первичной фракции.

Из-за наличия растворной части в зернах первичного щебня, заполнители из дробленого бетона имеют существенные отличия от естественных материалов. Стоит отметить, что количество растворной части может различаться в зависимости от фракции щебня. и имеет существенное воздействие на свойства бетона, изготовленного из него.

В случае наличия раствора на щебне, его характеристики снижаются, наличие раствора приводит увеличению водопоглощения, дробимости и истираемости заполнителя.

Результаты многих исследований, показывают, что содержание раствора на поверхности зерен может колебаться от 36% до 39% и зависит от водоцементного соотношения.

Влияние формы зёрен щебня, размер которых составляет 5-10 мм и более, на свойства окончательной бетонной смеси.

- Зёрна с преобладанием цементно-песчаного раствора, которые были замечены на первоначальном крупном наполнителе. Их процент составляет 30,6%.

- Зёрна, которые состоят только из цементно-песчаного раствора составляют 61% от общего количества.

- Дробленые зёрна первичного крупного заполнителя составляют 8,4% от общего количества.

В соответствии с полученными данными, можно сделать вывод о том, что щебень 5-10 мм, полученный в результате измельчения бетона, в большинстве состоит из цементно-песчаного раствора и щебня с налипшим раствором.

В результате проведения исследований выяснилось, что присутствие в структуре налипшего раствора вызывает снижение модуля упругости. на 7-18 % по сравнению с аналогичными стандартными бетонами. [26]

В случае использования самоуплотняющегося бетона с применением дробленого щебня, следует учитывать данное замечание.

Кроме того, важно отметить о том, что при измельчении бетона, его отсев содержит свойства вторичного вяжущего, вследствие содержания большого количества клинкерных минералов добавок, их доля может составлять до четверти от объема.

Как ранее излагалось, в процессе дробления бетона, зернышки щебня имеют неправильную форму и структуру, а также высокую степень пористости, что приводит к повышению водопоглощения. Именно эти факторы являются ключевыми при рассмотрении свойств самоуплотняющейся смеси. [37].

Применение щебня полученного путем дробления боя бетона может привести к уменьшению реологических свойств и сокращению срока сохранения характеристик бетонной смеси вследствие сорбционных процессов, вызванных заполнителем. Применение оптимального объема дробленого бетона в сочетании с современными поликарбоксилатными пластификаторами позволит устойчиво смешать компоненты и предотвратить диссоциацию смеси.

Чтобы достичь самоуплотнения, требуется увеличенное содержание вяжущего вещества, но при этом объем щебня ограничен.

По этой причине, в процессе уплотнения бетона крупные частицы заполнителя находятся в состоянии так называемой "плавающей" структуры. Свойства данного вида бетона больше зависят от свойств используемого вяжущего (включая количество и активность цемента, наличие микрозаполнителей, адгезию цементного камня к заполнителям, качество зоны контакта), чем от прочности крупного наполнителя.

После получения зерна из дробленого бетона с размером фракции 5-10 мм, поверхность его имеет сложный характер: здесь присутствуют трещины и неровности, которые возникают в процессе дробления.

3.2 Определение состава бетона с учетом структурных характеристик

Точное определение состава бетона играет ключевую роль в обеспечении его эксплуатационных характеристик. Соотношение между составом, структурой и свойствами представлено с использованием, математических моделей.

Для приготовления самоуплотняющихся бетонных смесей, следует руководствоваться стандартом ГОСТ Р 59714-2021 «Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия» [23].

Для обеспечения согласованности между математическими моделями, требуется привести к общим критериям. Для определения структуры

самоуплотняющегося бетона, использовались структурные свойства, определяемые в конце процесса формирования структуры.

Сумма цемента и микронаполнителя, являющаяся составной частью вяжущего, является фундаментальной основой бетона, которая определяет его макроструктуру как целого;

На свойства бетона оказывает влияние водоцементное отношение. Это оказывает влияние на такие характеристики, как размер, форма и количество пустот, а также зависит качество контактной зоны;

Во время затвердевания цементного камня происходит процесс гидратации, который показывает степень изменения прочности материала. Количество новообразований в цементном камне напрямую зависит от уровня гидратации. Количественное значение данного показателя равно отношению реакции, в вяжущем, к общему объему.

Завершающий этап хода создания структуры, в результате которого формируется итоговая объемная концентрация вяжущего, складывается из суммы объема воды и вяжущего. Данный процесс включает в себя формирование особого материала, который будет подвергаться дальнейшей гидратации.

В процессе изготовления бетонов на заполнителях из вторичного песка и щебня стоит ожидать повышение усадочной деформации, это описывается в работе [43].

При подготовки самоуплотняющихся бетонных смесей, также стоит учитывать объемную долю мелкого и крупного заполнителя, они должны составлять, приблизительно одинаковый объем, это также отмечается в исследовании [2].

По представлению о структурной концепции, все существенные характеристики бетонов определяются функцией C , W и α , где:

В общей структуре можно увидеть значение C , которое отражает отношение между вяжущим и наполнителем.

Показатели W и α характеризуют объем пор, описывая

микроструктуру материала.

К тому же, микроструктура включает в себя информацию о структуре заполнителя и контактной зоны. Когда мы говорим о макроструктуре, в список ее основных элементов входят такие составляющие как щебень, песок, растворная часть, с контактной зоной.

В целях получения наиболее конкретного прогноза свойств, которые будут получены при получении самоуплотняющегося бетона, в его состав были включены следующие;

1. Приведенный показатель $R_{за}$ характеризует отношение прочности на сжатие бетона, который был получен с использованием рассматриваемых наполнителей и прочности бетона, сделанного из естественного песка;

2. Эффект от количества суперпластификатора на ключевые свойства самоуплотняющегося бетона.

Одна из наиболее важных особенностей структурной теории бетона заключается в том, что все характеристики и свойства исследуются с учетом одних и тех же параметров: C , W , α .

Увеличить эффективность можно при помощи данных характеристик, а также используя компьютерные программы, используемые для расчета.

3.3 Физико-механические свойства самоуплотняющегося бетона с крупным заполнителем из бетонного лома.

Для того, чтобы изучить физико-механических свойств самоуплотняющегося бетона, был проведен ряд экспериментов

В процессе создания бетона были применены следующие материалы:

- Песок «Камского месторождения» $M_{кр} = 3,53$;
- Песок «Волжского месторождения» $M_{кр} = 1,3$;
- Песок из отсева дробления бетонной $M_{кр} = 2,99$;
- Щебень «Карбонатных пород» М600;
- Щебень «Гранитных пород» М1200;
- Щебень из отсева дробления бетонной М800;

- В качестве вяжущего портландцемент ЦЕМ I 42,5Н «Вольского завода», соответствующий требованиям ГОСТ 31108 – 2020 «Цементы общестроительные. Технические условия» [17];
- суперпластификатор товарной марки «АХТОН»;
- микронаполнитель высокоактивный метакаолин производства компании «Синерго»;
- микронаполнитель высокоактивный микрокремнезем.

В целях изучения взаимосвязи между прочностью бетона от вида заполнителя, следует создать экспериментальные партии образцов. Они должны включать в себя различные виды крупных заполнителей, микронаполнителей и пластифицирующие добавки.

В процессе определения основных компонентов самоуплотняющей смеси, были проведены три этапа исследований.

Влияние состава крупного заполнителя на прочность при сжатии и изгибе самоуплотняющихся бетонов;

Влияние компонентов на прочность при сжатии бетона, с использованием заполнителя, приготовленного из измельченного бетона.

Воздействия комплексной добавки на пористость и водопоглощение самоуплотняющегося бетона с примененным крупным заполнителем из дробленного бетона;

При исследовании прочности на сжатие самоуплотняющегося бетона на вторичном заполнителе, а также для определения пористости и водопоглощения были использованы образцы с размером сечения 70 мм.

- Твердение образцов бетона проводилось в нормальных условиях окружающей среды.
- Показатели прочности сжатия были рассчитаны через 7, 14 и 28 суток.
- Показатели пористости и водопоглощения были измерены через 48 часов после того, как образцы были помещены в влажную среду.

Первый этап исследований был посвящен изучению влияния состава крупного заполнителя на прочность самоуплотняющегося бетона при сжатии.

Экспериментальные образцы бетона семи разных партий были изготовлены с целью изучения влияния заполнителя из переработанного бетона на прочность при сжатии.

Готовые образцы бетонов с размером сечения в 70мм демонстрируются на рисунке 29.



Рисунок 29 – Бетонные образцы с размером сечения 70 мм

В целях изучения влияния крупного заполнителя на прочность образцов бетона, были приготовлены семь различных составов, (Таблица 5):

– Состав 1: Портландцемент; Песок Волжский; Щебень карбонатный; Вода; Суперпластификатор

– Состав 2: Портландцемент; Песок Волжский; Щебень гранитный; Вода; Суперпластификатор

– Состав 3: Портландцемент; Песок Камский; Щебень карбонатный; Вода; Суперпластификатор

– Состав 4: Портландцемент; Песок Камский; Щебень гранитный; Вода; Суперпластификатор

– Состав 5: Портландцемент; Песок из отсева бетона; Щебень из отсева дробления; Вода; Суперпластификатор

– Состав 6: Портландцемент; Песок из отсева бетона; Щебень из отсева дробления; Вода; Суперпластификатор; высокоактивный микрокремнезем

– Состав 7: Портландцемент; Песок из отсева бетона; Щебень из отсева дробления; Вода; Суперпластификатор; высокоактивный метакаолин

Таблица 5 – Составы бетонных смесей.

Наименование	1-я партия	2-я партия	3-я партия	4-я партия	5-я партия	6-я партия	7-я партия
Портландцемент	665	683	678	681	847	825	817
Песок «Волжский»	638	656	-	-	-	-	-
Песок «Камский»	-	-	651	654	-	-	-
Песок из отсева бетона	-	-	-	-	510	425	357
Щебень «Карбонатный»	605	-	617	-	-	-	-
Щебень «Гранитный»	-	621	-	620	-	-	-
Щебень из отсева	-	-	-	-	485	403	339
Вода	300	307	306	306	380	411	399
Суперпластификатор	7	7	7	7	8	8	8
Метакаолин	-	-	-	-	-	-	191
Микрокремнезем	-	-	-	-	-	71	-
Плотность бетонной смеси	2215	2274	2259	2268	2230	2143	2111
единицы изменения, кг/м ³							

Если сравнивать смеси бетона, то при подобных составах, подвижность смеси на песке из отсева была ниже, чем у других видов песков.

У песка, из отсева дробления бетона, более высокая степень водопоглощения за счет наличия шероховатости и наличия ранее налипшего раствора, что приводит к тому, что смесь на основе мелкого заполнителя из отсева раздробления является более жесткой и обладает меньшей подвижностью по сравнению с природными материалами.

Образцы партий №1, 2 на Волжском песке показали меньший расплыв конуса, чем на Камском песке партии №3, 4, тем не менее на песке из отсева

дробления показал наибольший распыл на встряхивающем столике, в связи с применением большего количества воды вследствие повышенного водопоглощения смеси.

Результаты распыла на встряхивающем столике представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты распыла смесей.

Распыл на встряхивающем столике, см						
1-я партия	2-я партия	3-я партия	4-я партия	5-я партия	6-я партия	7-я партия
40,96	42,53	43,32	43,71	59,2	56,4	54,8

После приготовления образцов бетона 7 партий на 7, 14 и 28 сутки образцы испытывались на гидравлическом прессе марки «ПГ-50». На рисунках 30, 31 демонстрируются процесс подготовки к испытаниям бетонных образцов на сжатие.



Рисунок 30 – Установленный бетонный образец на площадку гидравлического пресса марки «ПГ-50»



Рисунок 31 – Общий вид гидравлического пресса марки «ПГ-50» с подготовленным бетонным образцом

В таблице 7 и на рисунках 33, 34 представлены результаты проведенных испытаний на прочность, при сжатии образцов, а также рисунок 32 наглядно демонстрирует разрушение бетонного образца.



Рисунок 32 – Разрушенный бетонный образец под действием сжимающей силы, гидравлического пресса марки «ПГ-50»

Таблица 7 – Результаты испытаний образцов на прочность при сжатии

Возраст	Предел прочности на сжатие, МПа						
	1-й Образец	2-й Образец	3-й Образец	4-й Образец	5-й Образец	6-й Образец	7-й Образец
7 Сутки	40,96	42,53	43,32	43,71	44,49	40,77	41,65
14 Сутки	43,32	44,49	49,29	46,94	49,00	44,00	45,18
28 Сутки	46,84	48,12	54,88	50,96	53,02	50,96	46,75

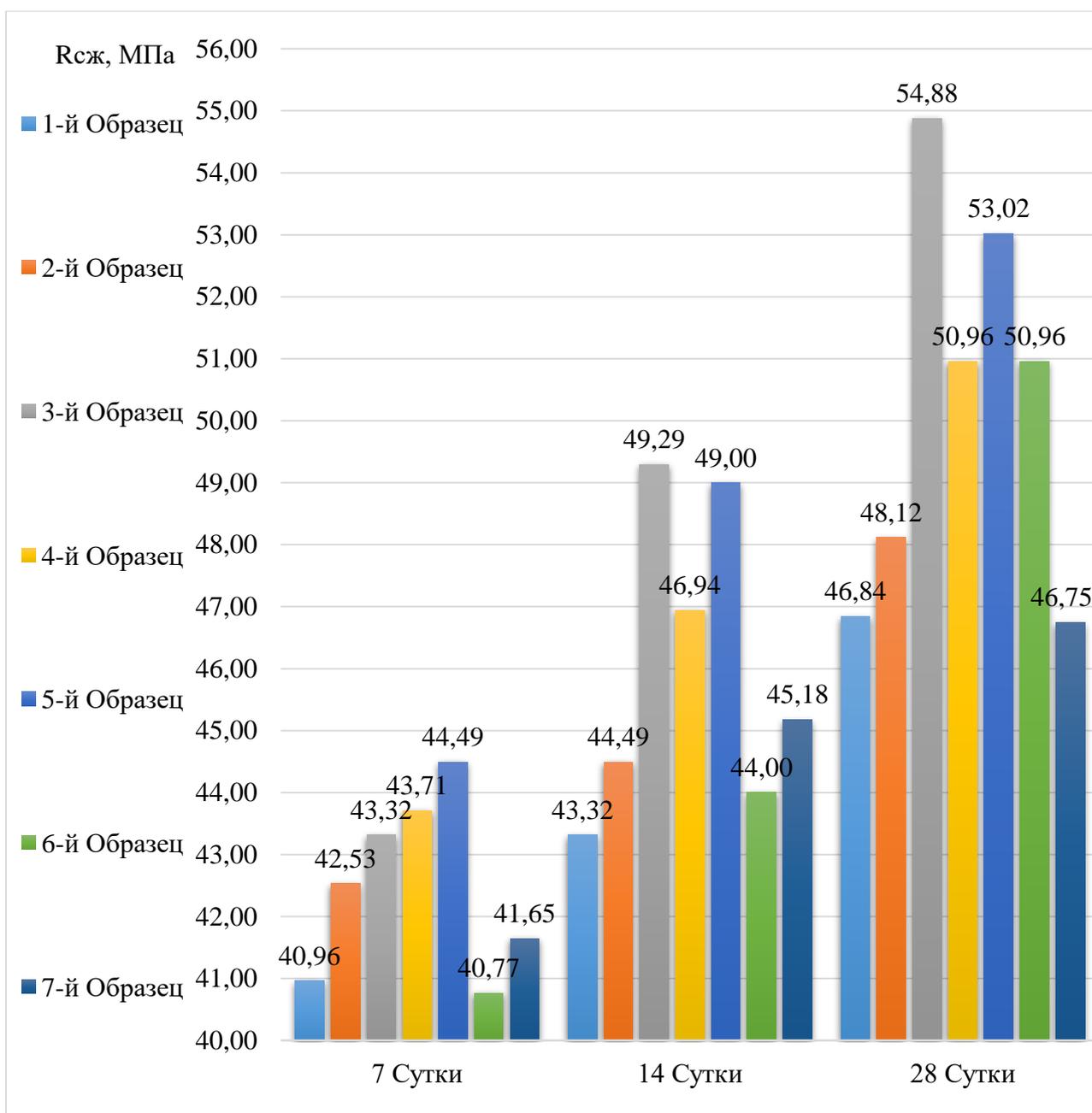


Рисунок 33 – Диаграмма роста предела прочности на сжатие от 7-х до 28-х суток, МПа

Из рисунка 33 можно увидеть, что образцы с применением только природного заполнителя в своём составе достигают наибольшей прочности: на 28 суток прочность составляет 54,88 МПа, однако, при сравнении образца бетона, который был полностью изготовлен из отходов строительства партии №5, с природным материалом, можно заметить, что прочность в некоторых случаях может быть обеспечена, даже больше, чем на природных материалах.

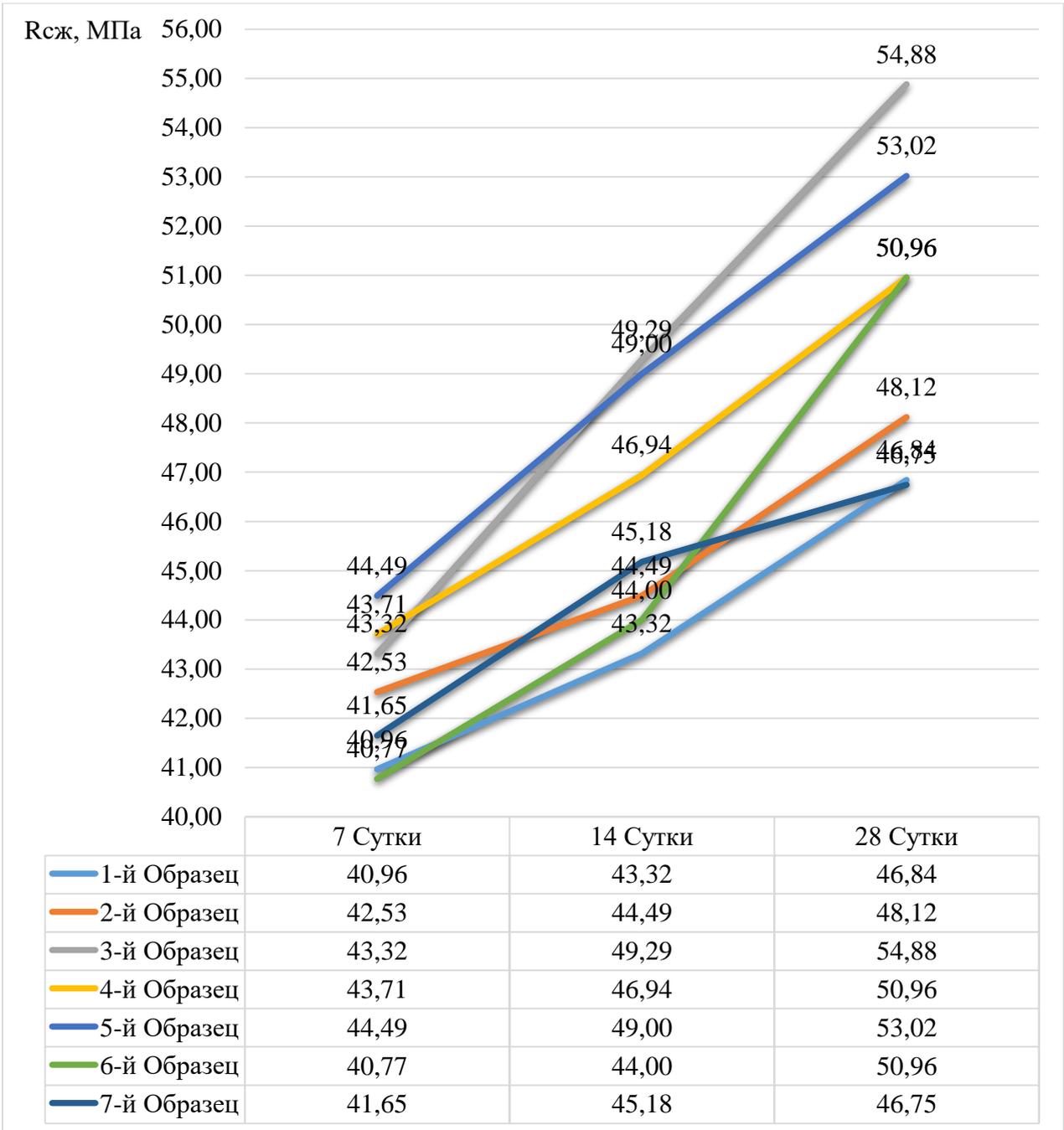


Рисунок 34 – Линейный график роста предела прочности на сжатие от 7-х до 28-х суток, МПа

По вышеуказанным составам, также были изготовлены бетонные призмы с размерами 40×40×160 мм для определения предела прочности на осевое растяжение при изгибе бетонных образцов. На рисунке 35 и в таблице 8 представлены результаты проведенных испытаний предела прочности при изгибе бетонных образцов.

Таблица 8 – Результаты испытаний образцов на прочность при изгибе бетонных образцов на 28-е сутки

Возраст	Предел прочности на осевое растяжение при изгибе, МПа						
	1-й Образец	2-й Образец	3-й Образец	4-й Образец	5-й Образец	6-й Образец	7-й Образец
28 Сутки	4,37	4,49	4,88	4,56	4,61	4,52	4,38

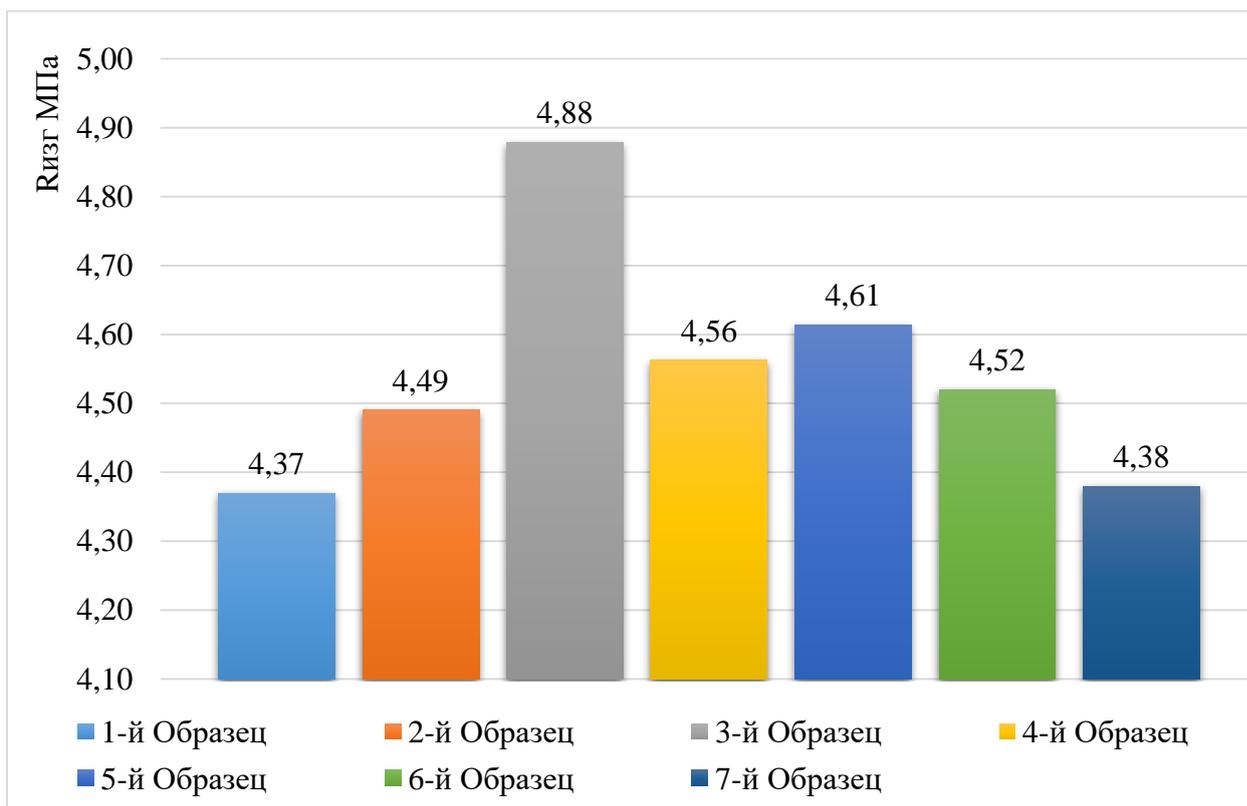


Рисунок 35 – Результаты испытаний образцов на прочность изгибе бетонных образцов на 28-е сутки, МПа

При анализе данных таблицы 8 и рисунка 35 можно сделать вывод о том, что наибольшая прочность на осевое растяжение при изгибе образцов из бетона, изготовленных в партии №3, составляет 4,88 МПа, однако разница образцов изготовленных из продукта дробления можно считать незначительной и находится в диапазоне от 3-6% от среднего значения прочности которое равно 4,87 МПа.

3.4 Влияние добавок на пористость и водопоглощение самоуплотняющегося бетона

Пористость в бетоне играет критическую роль в его механических свойствах и долговечности. Высокая пористость и как следствие, высокое водопоглощение могут привести к снижению прочности бетона и его расслаиванию.

Пористость влияет на прочность бетона. Чем выше пористость, тем ниже прочность, поскольку поры слабые места, уменьшающие сопротивление материала к разрушению. Плотный бетон с меньшей пористостью обычно обладает более высокой прочностью.

Пористость может привести к проникновению воды в структуру бетона. При замерзании влаги могут образовываться ледяные кристаллы, что приводит к разрушению материала. У более пористого бетона повышен риск разрушения из-за мороза.

В целях проведения измерений пористости и водопоглощения, были использованы образцы, соответствующие составам предыдущих партий. Эти показатели имеют решающее значение при разработке состава бетонной смеси. Результаты испытаний на водопоглощения указаны в таблице 9.

Таблица 9 – Водопоглощение бетонных образцов

При нормальных условиях твердения		1-я партия	2-я партия	3-я партия	4-я партия	5-я партия	6-я партия	7-я партия
W по массе, %	7 Сутки	7,04	7,18	6,61	6,67	7,935	8,28	7,01
	28 Сутки	6,16	6,28	5,78	5,84	4,945	4,83	4,25
W по объему, %	7 Сутки	16,26	16,58	15,26	15,41	19,43	19,85	16,845
	28 Сутки	14,22	14,51	13,35	13,48	16,81	17,95	15,74

Благодаря содержанию высокоактивного метаксаолина в самоуплотняющихся бетонах водопоглощение уменьшается в сравнении с

остальными образцами из переработанного бетона. У образцов бетона с содержанием 15% ВМК значение водопоглощения является наименьшим среди партий из переработанного бетона.

На основе данных о плотности и плотности бетона в сухом состоянии были проведены расчеты, которые позволили определить полный объем пор образцов самоуплотняющегося бетона.

Характеристики пористости самоуплотняющихся бетонов представлены в таблице 10.

Таблица 10 - Полный объем пор образцов самоуплотняющегося бетона

№ Партии	Плотность, кг/м ³			П _п , %
	Сухое состояние	Естественное состояние	Истинная плотность	
5	2420	2512	2550	5,09
6	2440	2489	2550	4,31
7	2375	2392	2550	6,86

Пористость всех образцов бетона находится в диапазоне от 4% до 7%, образцы с использованием высокоактивного микрокремнезема показали самую низкую пористость, при этом в нашем случае образец №7 с использованием в смеси высокоактивного метаксаолина показал самую высокую пористость образца и вследствие обладал на 28-е сутки наименьшей прочностью на сжатие.

3.5 Оценка экономической эффективности внедрения самоуплотняющихся бетонов.

Процесс оценки экономических преимуществ применения самоуплотняющегося бетона с добавкой бетонного лома включает: проведение анализа расходов на материалы, выявление снижения общих

затрат на материалы и затрат за счет уменьшения необходимого трудового вклада при его использовании.

Произведем приблизительный расчет себестоимости состава самоуплотнящихся бетонов и произведем оценку стоимости первичного и вторичного материала

Таблица 11 демонстрирует произведенный расчёт себестоимости состава СУБ на основе первичных материалов и отдельно выделены крупный и мелкий вторичный заполнитель для оценки в разнице стоимости материалов. Рисунок 36 показывает затраты на крупный и мелкий заполнитель природного и вторичного происхождения и отражает денежную экономию при выборе вторичного материала.

Таблица 11 - Себестоимость состава СУБ

Наименование сырьевого материала	Единицы измерения	Стоимость, руб.
Первичные материалы		
«Вольский цемент» портландцемент ЦЕМ I42,5Н	т	9400,00
Щебень гранитный фр. 5-20 мм	т	2300,00
Песок «Камский»	т	510,00
Суперпластификатор товарной марки «Ахтон»	л	181,00
Микронаполнитель микрокремнезем	кг	30,00
Вода	м ³	44,88
Переработанные материалы		
Вторичный щебень фр. 5-20 мм	т	2120,00*
Отсев вторичного щебня фр. 0-5 мм	т	415,00*
*Для оценки используется средняя стоимость, по прайс-листу компаний «Платон-строй» и «ТрансГруппСтрой»		

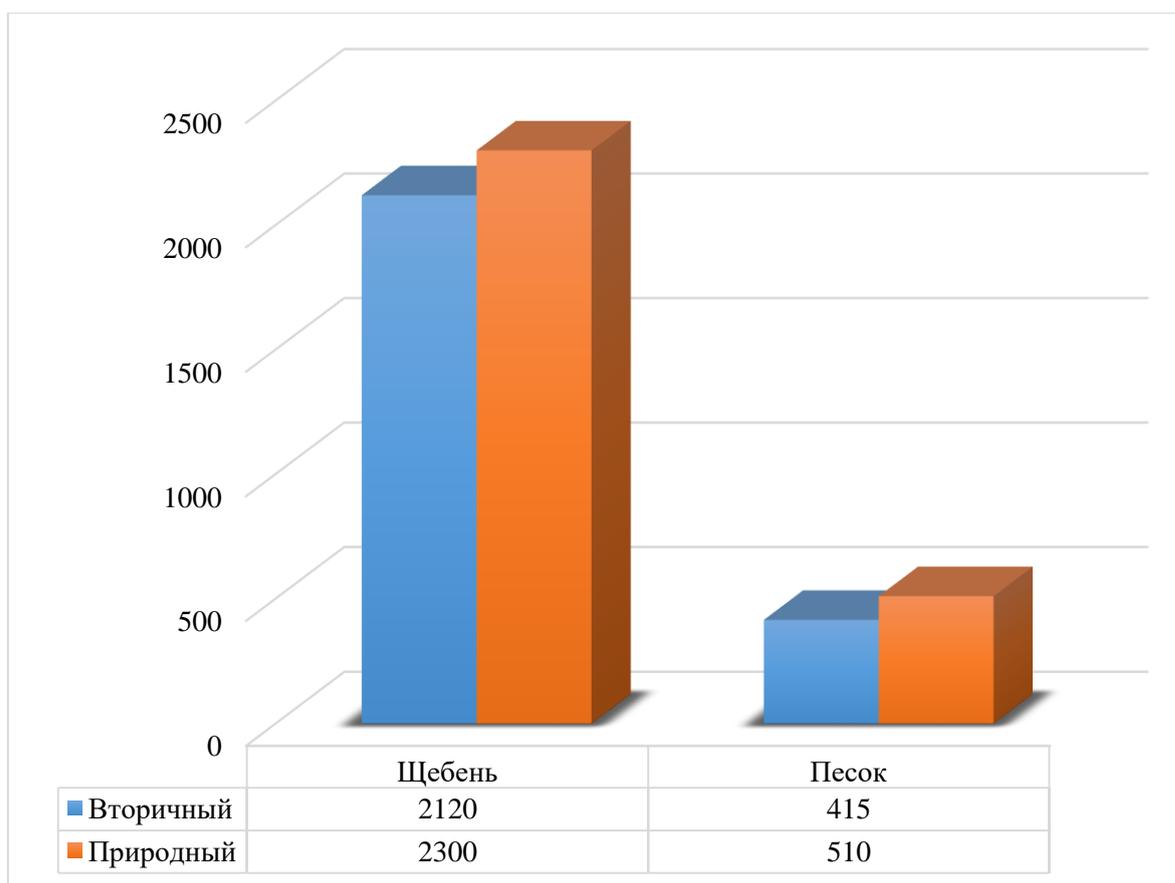


Рисунок 36 – Затраты на тонну мелкого/крупного заполнителя в рублях

Исходя из учета только конечного материала можно увидеть, что вторичный продукт дробления дешевле первоначального приблизительно на 8% в случае с щебнем и 18% в случае с песком, при этом данные цены могут еще варьироваться и быть еще меньше в случае, когда производства заполнителей организовано непосредственно на объекте строительства, что будет также исключать из себя цену на транспортную логистику.

На основе приблизительных расчетов можно рассчитать примерную стоимость работ по созданию 1 м² и толщиной 0,15 м. покрытия пола производственного здания с учетом затрат на его изготовление в БСУ, то она составит 1115 руб., 110 руб. упрочняющая пропитка при расходе 0,2 л/м², следовательно, на все у нас уйдет 1225 руб.

Возьмем для сравнения устройство напольного цементобетонного покрытия в промышленном здании. Обычно для устройства такого покрытия,

при использовании бетона марки П2 с классом прочности В25 на щебне из гранита фракции 5-20 мм, цена составляет около 3900 рублей за 1 м³.

Для того чтобы упростить расчеты, предположим, что в обоих идентичное армирование. Для бетонного покрытия из тяжелого бетона класса прочности В25 требуется использование топпинга для верхнего слоя.

Данные о расходе топпинга зависят от типа покрытия и нагрузки, которая будет оказана на покрытие пола.

Уровень расхода топпинга для одного квадратного метра составляет 3 кг, а в случае интенсивной эксплуатации он может достигать до 10 кг/м².

Установлено, что за м² покрытия из бетона составляет: 585 рублей.

Топпинг с расходом 7 кг на м² обойдется в 320 рублей.

Упрочняющая пропитка на м² обойдется в 106 рублей.

В результате получается, что затраты на материалы составляют 1008 руб. за м² площади в целом.

Тяжелый бетон, в отличие от самоуплотняющегося бетона, требует больше трудозатрат на вибрирование, уплотнение и заглаживание бетонной смеси.

Общие затраты на материалы и дополнительные работы на устройство тяжелого бетона примерно равны 1450 рублям.

Следовательно, самоуплотняющиеся бетонные полы, предназначенные для использования в производственных помещениях, будут стоить на 225 дешевле, нежели чем аналоги из тяжелых бетонов. Рисунок 37 демонстрирует затраты на материалы и дополнительные работы на устройство тяжелых бетонов и отражает экономию при устройстве самоуплотняющихся бетонов.

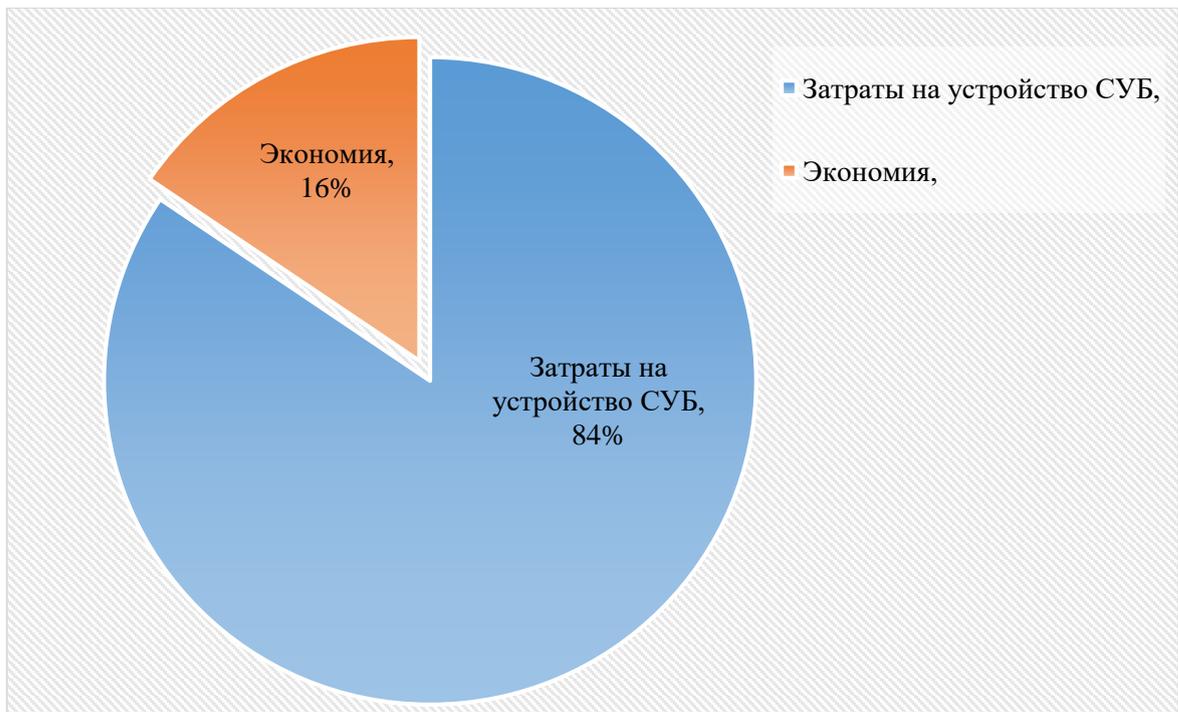


Рисунок 37 – Диаграмма затрат на материалы и дополнительные работы на устройство тяжелых бетонов

Причина этого заключается в том, что не приходится затрачиваться на второстепенные работы. К тому же, применение СУБ способствует увеличению производительности труда и снижению трудозатрат при выполнении строительных работ.

Использование разработанного бетона с возможностью самоуплотнения является перспективным решением с точки зрения экологии. В основе предлагаемого способа лежит эффективное использование отходов бетона и железобетона, как основы для создания высокоэффективного самоуплотняющегося бетона.

Выводы по главе 3:

– Теоретически и экспериментально подтверждена возможность использования дробленого боя бетона в качестве заполнителей для самоуплотняющихся бетонных смесей.

– Щебень, полученный лабораторным путем, в процессе дробления

боя бетона имеют отличия по составу и структуре зёрен. Поверхность зерен щебня имеет трещины, неровности и шероховатую структуру

– Используя данный лабораторный метод измельчения бетона, можно получить щебень фракции 5-10 мм с содержанием лещадных зерен до 20%.

– Исследования показывают, что использование нового самоуплотняющегося бетона может быть экономически выгодным в особенности если не будет затрагивать ни одной транспортной операции для изготовления бетонных смесей.

– Описанный в исследовании метод является эффективным способом переработки огромного количества отходов железобетонных конструкций.

Заключение

На основании результатов проведенных экспериментальных исследований следует ряд выводов:

Вследствие анализа физико-механических свойств полученных партий самоуплотняющихся бетонов на основе заполнителей из бетонного лома и бетонов на заполнителях природного происхождения доказано, что применение заполнителей, полученных в результате дробления является возможным и целесообразным способом применения в технологии изготовления бетонов, полученные бетоны не уступают и способны обеспечивать большую прочность, на сжатие и изгиб в сравнении с бетонами изготовленных на природном заполнителе.

В результате оценки технико-экономической эффективности предложенного технического решения следует отметить, что использование вторичных заполнителей из дробленого бетонного лома, в технологии изготовления бетонов, является экономически выгодным способом его применения, в особенности если максимально сокращена транспортная логистика, когда бетонные смеси изготавливаются непосредственно на месте проведения работ по сносу старого, ветхого или аварийного жилья.

Использование разработанного самоуплотняющегося бетона является перспективным решением с точки зрения экологии. и является эффективным методом использования отходов бетона и железобетона, как основой для создания самоуплотняющегося бетона, вследствие позволяет более рационально применять отходы, от сноса старых зданий и сооружений которые подлежат демонтажу.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Алимов Л.А. Развитие теории и совершенствование технологии бетона на основе его структурно-технологических характеристик: дис ... д-ра. тех. наук: 05.23.05/ Алимов Лев Алексеевич. М., 1982. – 429 с.
2. Бабаев Ш.Т. Повышение прочности цементного камня / Ш.Т. Бабаев, Н.Ф. Башлыков, И.Я. Гольдина // Цемент. – 1990. – № 9. – С. 13-15.
3. Баженов Ю. М. Бетонведение: учебник / Баженов Ю. М. – М.: Изд-во АСВ, 2015. – 144 с.
4. Баженов Ю. М. Структура и свойства бетонов с наномодификаторами на основе техногенных отходов: Монография / Ю.М. Баженов, Л.А. Алимов, В.В. Воронин – М.: МГСУ, 2013. – 200 с.
5. Балакшин А. С. Повышение эффективности малоцебечных бетонов путем комплексного использования бетонного лома: диссертация ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Балакшин Андрей Сергеевич. – М., 2010. – 123 с.
6. Белов В.В. Теоретическое обоснование оптимальных зерновых составов композиционных материалов с минеральными наполнителями / В.В. Белов, П.В. Куляев // Строительство и реконструкция. – 2017. – № 5 (73). – С. 94-101.
7. Глужге П.И. Заполнители из разрушенного бетона // Труды научно-технических институтов. – М.: Гидротехническое строительство, 1946. – № 4. – С. 27-28.
8. Головин Н.Г. Проблема утилизации железобетона и поиск эффективных путей ее решения / Н.Г. Головин, Л.А. Алимов, В.В. Воронин // Научно-технический журнал «Вестник МГСУ». – 2011. – № 2. – С. 67.
9. ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. Введ. 2013-07-01. – М.: Стандартиформ. 2018. - 35с.
10. Смеси бетонные. Методы испытаний. Введ. 2015- 07-01. – М.: Стандартиформ, 2019. – 28с.
11. ГОСТ 12730.0-2020 Бетоны. Общие требования к методам определения плотности, влажности, водопоглощения, пористости и

- водонепроницаемости. Введ. 2021-09-01. – М.: Стандартиформ. 2020. - 2с.
12. ГОСТ 12730.2-2020 Бетоны. Метод определения влажности. Введ. 2021-09-01. – М.: Стандартиформ. 2021. - 3с.
13. ГОСТ 12730.3-2020 Бетоны. Метод определения водопоглощения. Введ. 2021-09-01. – М.: Стандартиформ. 2021. - 3с.
14. ГОСТ 12730.4 – 2020 Бетоны. Методы определения параметров пористости. Введ. 2021-09-01. – М.: Стандартиформ. 2021. - 8с.
15. ГОСТ 26633-2015 Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. Введ. 2016-09-01. – М.: Стандартиформ. 2019. - 24с.
16. ГОСТ 30515 – 2013 Цементы. Общие технические условия. Введ. 2015-01-01. – М.: Стандартиформ, 2019. – 36с.
17. ГОСТ 31108 – 2020 Цементы общестроительные. Технические условия. Введ. 2021-03-01. – М.: Стандартиформ, 2020. – 15с.
18. ГОСТ 32495-2013 Щебень, песок и песчано-щебеночные смеси из дробленого бетона и железобетона. Введ. 2015-01-01. – М.: Стандартиформ, 2014. – 6с.
19. ГОСТ 8267–93 Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. Введ. 1995-01-01. – М.: Стандартиформ, 2010. – 21с.
20. ГОСТ 8269.0-97. Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний. Введ. 1998-07-01. – М.: Стандартиформ. 2018. - 49с.
21. ГОСТ 8735-88. Песок для строительных работ. Методы испытаний. Введ. 1989-07-01. – М.: Стандартиформ, 2014. – 25с.
22. ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия (с поправкой). Введ. 2015-04-01. – М.: Стандартиформ, 2019. – 7с
23. ГОСТ Р 59714-2021 Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия. Введ. 2022-01-01. – М.: Стандартиформ. 2021. - 16с.
24. Гусев Б.В. Возможность вторичного применения бетонолома /

Б.В.Гусев, Ю.Р. Кривобородов, В.А. Потапова // Техника и технология силикатов. – 2020. – Т. 27. – № 1. – С. 28–31.

25. Гусев Б.В. Вторичное использование бетонов / Б.В. Гусев, В.А. Загурский.- М.: Стройиздат, 1988. – 96 с.

26. Еленова А.А. Синтез расширяющей добавки для устранения усадки цементного камня / А.А. Еленова, Ю.Р. Кривобородов // Вестник МГСУ. – 2017. –Т. 12. – № 3 (102). – С. 326-333.

27. Загурский В.А. Отходы бетона — сырье для производства заполнителей повторного применения. Пути использования вторичных ресурсов для производства строительных материалов и изделий / В.А. Загурский, А.В. Простяков, О.И. Щербакова // Чимкент. – 1986. – № 15. – С. 40-42.

28. Изотов В.С. Химические добавки для модификации бетона: монография / В.С. Изотов, Ю.А. Соколова. – М.: Изд-во «Палеотип», 2006. – 244 с.

29. Коровкин М.О. Использование дробленого бетонного лома в качестве заполнителя для самоуплотняющегося бетона / Коровкин М.О, Шестернин А.И, Ерошкина Н.А // Инженерный вестник Дона, №3 . – С. 11.

30. Красиникова Н.М. Вторичное использование бетонного лома в качестве сырьевых компонентов цементных бетонов / Н.М. Красиникова, Е.В. Кириллова, В.Г. Хозин // Строительные материалы. – 2020. – № 1–2. – С. 56–65.

31. Курочка П.В, Мирзалиев Р.Р Свойства щебня из продуктов дробления вторичного бетона как инертного заполнителя бетонных смесей // ИВД. 2012. №4-2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/svoystva-shebnya-iz-produktov-drobleniya-vtorichnogo-betona-kak-inertnogo-zapolnitelya-betonnyh-smesey>

32.Магсумов А.Н. Использование бетонного лома в качестве крупного заполнителя для производства бетонных смесей / А.Н. Магсумов, Н.М. Красиникова, Н.М. Шарипянов // Символ науки, 2018. – №6.

33. Микрокремнезём [Электронный ресурс] // Микрокремнезём: [сайт]. [2022]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Микрокремнезём>

34. Муртазаев С-А. Ю. Эффективные бетоны и растворы на основе техногенного сырья для ремонтно-строительных работ: дис. д-ра техн. наук: 05.23.05 / Муртазаев Сайд-Альви Юсупович. – Грозный, 2009. – 383 с.

35. Муртазаев С-А.Ю. Утилизация отсева дробления бетонного лома / А.Ю Муртазаев, З.Х. Исмаилова, А.А. Хасиев, М.Р. Нахаев // Экология и промышленность России. – 2012. – №8. – С. 26-28.

36. Муртазаев С-А.Ю., Сайдумов М.С., Абдуллаев М.А-В., Хасиев А.А. Использование механоактивированных отсеков дробления бетонного лома в производстве бетонокомпозитов // Вестник ДГТУ. Технические науки. 2011. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-mehanoaktivirovannyh-otsevov-drobleniya-betonogo-loma-v-proizvodstve-betonokompozitov>

37. Наруть В.В. Оценка качества продуктов дробления бетонного лома для его применения в технологии бетона / В.В. Наруть, О.А. Ларсен // БСТ – Бюллетень строительной техники. — 2018. — №. 10 (1010). — С. 47–49.

38. Пластификатор [Электронный ресурс] // Пластификатор (строительство): [сайт]. [2022]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Пластификатор_\(строительство\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Пластификатор_(строительство))

39. Портландцемент [Электронный ресурс] // Портландцемент: [сайт]. [2022]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Портландцемент>

40. Фахратов М.А., Кужин М.Ф. Организация переработки отходов бетона и вторичное использование бетонов в строительстве // Системные технологии. 2018. №1 (26). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsiya-pererabotki-othodov-betona-i-vtorichnoe-ispolzovanie-betonov-v-stroitelstve>.

41. Федеральный закон от 01.07.2017 г. № 141-ФЗ «О внесении изменений в Закон Российской Федерации «О статусе столицы Российской Федерации» и отдельные законодательные акты Российской Федерации в

части установления особенностей регулирования отдельных правоотношений в целях реновации жилищного фонда в субъекте Российской Федерации – городе федерального значения Москве». М.: Кремль, 2017. – 38 с.

42. Чурсин С. И. Особенности крупного заполнителя из лома тяжелых бетонов / С. И. Чурсин, Е. А. Лобзанов // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2016. – Вип. 3. – С. 71-75.

43. Шестернин А. И. Исследование эффективности многостадийного дробления лома бетонных конструкций / А. И. Шестернин, О. А. Козюра, М. О. Коровкин // Теория и практика повышения эффективности строительных материалов: Материалы III Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Пенза: ПГУАС. – 2008. – С. 141-144.

44. Щековая дробилка [Электронный ресурс] // Щековая дробилка: [сайт]. [2024]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Щековая_дробилка

45. Abbas A. Proposed method for determining the residual mortar content of recycled concrete aggregates / A. Abbas, G. Fathifazl, O.B. Isgor, A.G. Razaqpur, B. Fournier, S. Foo // Journal of ASTM International. – 2008. – No. 5 (1).

46. Akbarnezhad A. Effects of the parent concrete properties and crushing procedure on the properties of coarse recycled concrete aggregates / A. Akbarnezhad, K.C.G. Ong, C.T. Tam, M.H. Zhang // Materials in Civil Engineering. – 2013. – No. 25. – P. 1795-1802.

47. Akbarnezhad A. Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates / A. Akbarnezhad, K.C.G. Ong, M. H. Zhang, C. T. Tam, T. W. J. Foo. // Construction and Building Materials. – 2001. – No. 25. – P. 3469-3479.

48. Buck A.D. Recycled concrete as a source of aggregate // Proc. of Symposium, Energy and Resource Conservation in the Cement and Concrete Industry. Canmet. Ottawa. – 1976.

49. Müller Ch., Reiners J., Palm S. Closing the loop: What type of

concrete re-use is the most sustainable option. Technical Report A-2015/1860, CEMBUREAU. The European Cement Association. – P. 41.

50. Pereira P. The effect of superplasticizers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates / P. Pereira, L. Evangelista, J. de Brito // Construction and Building Materials. – 2011. – Vol. 28. – No. 1. – P. 722-729.

51. Shima H. An advanced concrete recycling technology and its applicability assessment through input-output analysis / H. Shima, H. Tateyashiki, R. Matsubashi, Y. Yoshida // Journal of Advanced Concrete Technology. – 2005. – Vol. 3. – P. 53-67.

52. Shima H.T.H. New technology for recovering high-quality aggregate from demolished concrete / H.T.H. Shima, T. Nakato, M. Okamoto, T. Asano // Proceedings of Fifth International Symposium on East Asia Recycling Technology. – 1999. – P. 106- 109.

53. Wahlström M. Construction and Demolition Waste: challenges and opportunities in a circular economy / M. Wahlström, J. Bergmans, T. Teittinen, J. Bachér, A. Smeets, A. Paduart // European Topic Centre Waste and Materials in a Green Economy. – January 2020. – P. 10.