

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	3
Введение .....	7
Глава 1. Строительные системы, основанные на применении текстиль-бетонов .....	10
1.1. Виды текстиль-бетона и особенности его применения .....	10
1.2. Мелкозернистый модифицированный бетон, армированный дисперсными волокнами .....	14
1.3. Структура мелкозернистого бетона .....	18
1.4 Критерии эффективности систем с применением текстиль-бетонов .....	20
Выводы по главе 1 .....	22
Глава 2. Научные основы формирования структуры и свойств мелкозернистого бетона как основы текстиль-бетонов .....	24
2.1. Структурные деформации мелкозернистого бетона .....	24
2.2. Расчет модифицированного мелкозернистого бетона по плотности .....	33
2.3. Свойства композиционного вяжущего и его компонентов .....	39
2.3.1. Размолоспособность компонентов вяжущего .....	39
2.3.2. Пуццолановая активность вулканического туфа .....	41
2.3.3. Реологические свойства композиционного вяжущего .....	43
2.4 Усадка композиционного вяжущего .....	44
2.5. Оптимизации состава минерального вяжущего .....	50
2.5.1. Системный анализ как основа общей методологии оптимизации .....	50
2.5.2. Эксперимент по реализации методики подбора состава композиционного вяжущего .....	52
2.5.3. Эксперимент по оценке свойств композиционного вяжущего на основе вулканического туфа .....	56
Выводы по главе 2 .....	66
Глава 3. Бетонное полотно. Структура, свойства, технология .....	68
3.1. Структура и свойства бетонного полотна .....	68

3.2. Разработка методики подбора состава модифицированного мелкозернистого бетона как основы бетонного полотна.....	75
3.3. Технология бетонного полотна.....	88
3.4. Текстиль-гипсобетон как разновидность бетонного полотна.....	95
Выводы по главе 3.....	100
Глава 4. Армированные штукатурные покрытия.....	102
4.1. Системы фасадной изоляции и защиты.....	102
4.2. Эксплуатационная стойкость фасадных систем.....	109
4.2.1. Общая характеристика систем «Церезит».....	109
4.2.2. Оценка эксплуатационных характеристик систем.....	111
4.3. Методика оптимизации состава и прогнозирования свойств теплоизоляционной штукатурной смеси.....	116
4.3.1. Планирование эксперимента и оптимизация состава.....	116
4.3.2. Аналитическая оптимизация полученных результатов.....	119
4.4. Легкие и теплоизоляционные штукатурные покрытия.....	123
Выводы по главе 4.....	132
Заключение.....	134
Список использованных источников.....	137

## Предисловие

Текстиль-бетоны — это инновационная группа материалов, на основе которых осуществимо изготовление изделий и конструкций широкого функционального назначения с пониженной материалоемкостью и высокими эксплуатационными показателями по прочностным характеристикам и надежности. Основой для этих материалов являются модифицированные мелкозернистые бетоны, рецептура которых в настоящее время разрабатывается научными центрами, находящимися в России и за рубежом: в Германии, Китае, Японии, США.

К группе текстиль-бетонов относят текстильно усиленный бетон с применением сеток из минеральных или синтетических волокон, а также бетоны с объемным распределением волокон. К специальным видам текстиль-бетона относят бетонное полотно, гипсобетонное полотно и штукатурные фасадные системы, армированные сетками или с дисперсным армированием. По способу армирования текстиль-бетоны подразделяются на две большие группы: 2D-армирование плоскими сетками (текстильно усиленный бетон, армированные штукатурные покрытия) и 3D-объемное армирование: бетонное полотно, бетоны с дисперсным армированием.

Свойства специальных видов текстиль-бетона, как и, впрочем, и текстиль усиленного бетона определяются рецептурой мелкозернистого модифицированного бетона как основой минеральной матрицы; свойствами используемого вяжущего, типом и материалом армирования, характером адгезии матрицы и системы армирования. Важным является также минимизация усадочных деформаций, характерных для изделий толщиной до 100 мм, а для штукатурных покрытий — адгезия их к материалу основания. Все указанные аспекты и стали объектом исследований, результаты которых изложены в монографии.

Исследование направлено на разработку и развитие научных подходов получения мелкозернистых бетонов, армированных текстильным материалом (текстиль-бетонов). Реализация цели основывалась на решении группы частных задач: обзор производства и применения группы материалов под общим названием текстиль-бетон; разработка технологии бетонного полотна; изучение технологий и свойств армированных штукатурных покрытий; разработка методики комплексной оценки эффективности

текстиль-бетона; разработка мероприятий по снижению трещинообразования специальных видов текстиль-бетона.

Исследования проводились в НИИСФ РААСН и НИУ МГСУ, а также в ряде отечественных научных центров, в частности в лабораториях Геологического института РАН (ГИН). Большая часть исследований осуществлена в процессе реализации работ по гранту Минстроя. Тема фундаментальных научных исследований 3.1.2.1. «Развитие научных основ создания мелкозернистых бетонов, армированных текстильным материалом (текстиль-бетонов)». Результаты исследований нашли отражение в двух научно-квалификационных работах аспирантов «Вязущее и легкие штукатурные смеси на основе туфа-скория» (Демиссе Бекеле Арега) и «Мелкозернистый модифицированный бетон как основа бетонного полотна» (Поудел Рави Сагар). Научно-квалификационные работы находятся на стадии завершения. Авторы благодарят коллег, оказавших научную и методическую поддержку при подготовке материалов монографии.

## ВВЕДЕНИЕ

Текстиль-бетоны — это группа современных строительных изделий, основой формирования свойств которых является взаимодействие трех компонентов: минеральных вяжущих гидравлического твердения, плотного или пористого мелкого заполнителя, а также волокон различной природы: минеральных или синтетических, дисперсно-распределенных в материале или сплетенных в сетки с различными размерами ячеек [29, 30, 54]. Во всех случаях допускается применение гибридных волокон, то есть комбинации волокон различной природы: например, минерального и углеродного, стеклянного и целлюлозного и пр. [31, 32, 56].

Классическим является текстильно усиленный бетон, в котором слои мелкозернистого бетона армированы плоскими сетками из стеклянного или полимерного волокна, геотекстиля и его аналогов [40, 58, 59]. Значительное распространение получают мелкозернистые бетоны, армированные диспергированными в бетонной смеси отдельными волокнами — фибробетоны. Фибробетоны могут иметь плотную структуру и высокую прочность; такие материалы могут использоваться в нагружаемых сооружениях, в том числе в тонкостенных конструкциях и оболочках. Если фиброармированный материал имеет поризованную структуру, то на его основе изготавливают штучные изделия — ячеистобетонные блоки, имеющие более высокие эксплуатационные показатели по сравнению с неармированными аналогами [55, 57].

Становится популярным так называемое бетонное полотно. Этот вид текстильно-армированного бетона состоит из внешней оболочки, выполненной из двух холстов нетканого полотна и сердечника, состоящего из минерального вяжущего и наполнителя. В качестве наполнителя используют или кварцевый песок с размером частиц от 0,5 до 1 мм, или смесь кварцевого песка и армирующего волокна (с расходом до 1,5 %). Эти изделия в рулонах доставляют на объект, рулоны раскатывают, увлажняют, бетон сердечника схватывается, и в результате получают готовый элемент сооружения [13–15]. Этот способ технологичен, быстр в реализации и используется как в новом строительстве, так и при реконструкции.

Разновидностью текстиль-бетона можно считать также штучатурные покрытия с дисперсным армированием или армированные специальными видами сеток на полимерной основе,

на основе щелочестойкого стеклянного волокна и пр. Такие штукатурные покрытия используют в системах фасадных теплоизоляционных композиционных, а также в системах теплых или легких штукатурных покрытий. В первом случае штукатурное покрытие наносят на теплоизоляционный материал: специальные плиты на основе минеральной или каменной ваты, плиты из экструзионного пенополистирола или пенополиизоцианурата. Во втором случае легкая (теплоизоляционная) штукатурная смесь наносится непосредственно на материал основания: плотный или ячеистый бетон, кладку из керамического или силикатного кирпича и пр. Во всех вариантах применения наиболее важными критериями являются адгезия штукатурного покрытия к основанию и минимизация трещинообразования штукатурного покрытия, что является весьма характерным для изделий небольшой толщины [33, 49, 51].

Требования к фасаду здания, помимо декоративных характеристик и внешней выразительности включают также требование долговечности, с учетом того, что фасад подвергается воздействию всего комплекса атмосферных факторов. Материалы, используемые в фасадных системах, должны противостоять подобным воздействиям и сохранять целостность конструкции, то есть хорошую адгезию к основанию и стабильную плотность структуры. Это обеспечивается, в том числе, созданием условий для минимизации усадки штукатурного покрытия [41, 52, 63].

Важным теоретическим аспектом, ставшим предметом исследований, результаты которых изложены в монографии, являлось изучение пластической усадки, возникающей при твердении систем на основе гидравлического вяжущего: причин ее возникновения, механизма и последствий. Пластическая усадка на ранних стадиях твердения характерна для любых систем на основе гидравлического вяжущего и минеральных заполнителей, но в наибольшей степени проявляется в мелкозернистых бетонах и в еще большей — в изделиях, толщина которых не превышает 50 мм (относительно тонких изделиях). Все виды изделий, относящихся к группе текстиль-бетонов, таким образом, попадают в группу риска. Это и текстиль-усиленные бетоны, и изделия, относящиеся к специальным видам текстиль-бетона: бетонное полотно, армированные штукатурные покрытия и армированные легкие штукатурные покрытия, а также дисперсно-армированные мелкозернистые бетоны.

Изучение свойств подобных систем и являлось одной из целей исследований, изложенных в данной монографии. Осуществлена оценка стойкости фасадной облицовочно-декоративной системы по бетонному основанию и по керамической плитке к климатическим температурно-влажностным циклическим воздействиям. Также изучались возможности снижения усадочных деформаций, а следовательно, и снижения трещинообразования штукатурных фасадных систем. Изучение состояния вопроса и проведенные авторами исследования показали, что причиной пластической усадки на ранних стадиях твердения является создающееся в результате дефицита влаги внутреннее давление в капиллярах и, как следствие, происходит их сжатие и усадка. Разработаны предложения по компенсации дефицита влаги, которые проверены в результате проведения активного эксперимента.

Следует отметить, что энергетическая эффективность этой группы материалов обусловлена возможностью использования конструкций с меньшей толщиной (соответственно с меньшим расходом материала на единицу площади); возможностью частичной замены клинкера на менее энергоемкие, в том числе природные компоненты; в случае реализации систем фасадных теплоизоляционных композиционных — созданием надежных слоев внешней защиты, обуславливающей долговечность эксплуатации конструкции и стабильность свойств изоляционной оболочки.

# ГЛАВА 1

## Строительные системы, основанные на применении текстиль-бетонов

### 1.1. Виды текстиль-бетона и особенности его применения

Основными признаками текстиль-бетона являются наличие мелкозернистой матрицы на основе плотного или пористого мелкого заполнителя, наличие минерального вяжущего на основе портландцемента или портландцемента, модифицированного синтетическими или минеральными добавками (в том числе на основе отходов и продуктов реновации), и, самое главное, наличие армирующего материала: волокон или сеток. В соответствии с этими признаками можно выделить несколько групп изделий, объединяемых общим названием «текстиль-бетон».

Во-первых, это текстильно-усиленный бетон (текстильно-армированный бетон) — Textile-reinforced concrete. Эта разновидность и дала название всей группе материалов. Во-вторых, это бетонное полотно (Concrete Canvas). В-третьих, это дисперсно-армированный бетон, в том числе фибробетон, (сокращенно — GFRC/TRC/СФБ). В-четвертых, это штукатурные системы, армированные стеклянными сетками или сетками из нетканых полотен [7, 8]. В-пятых, это текстиль гипсобетон, материал, который может применяться как для оформления интерьеров, так и в фасадных, в том числе архитектурных системах при условии его модификации синтетическими полимерами [29, 37, 50].

Текстильно-армированный бетон — это тип армированного мелкозернистого бетона, в котором обычные стальные арматурные стержни или сетки заменены текстильными материалами. Исключение из конструкции стальной арматуры позволяет, с одной стороны, повысить долговечность конструкции, а с другой стороны, изготавливать изделия меньшей толщины. Увеличение долговечности связано с тем, что стальные изделия подвержены коррозионным процессам. В мелкозернистом (как и в любом другом) бетоне на основе клинкерных вяжущих образуется слабощелочная среда, оказывающая пассивирующее влияние на коррозию металла. Но в процессе эксплуатации за счет реакции между  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и  $\text{CO}_2$  воздуха образуется карбонат, а среда перестает быть слабощелочной, то есть создаются бла-



гоприятные условия для коррозии металла с очевидными последствиями. Использование полимерных сеток или сеток на основе щелочестойкого волокна или гибридных материалов позволяет исключить подобную опасность.

Волокна, используемые для изготовления ткани (базальтовое и углеродное волокно, джут, стекловолокно, кевлар, полипропилен, полиамиды (нейлон) и т. д.), имеют высокую прочность на разрыв при минимальном удлинении. Необходимо учитывать, что еще одним компонентом, определяющим долговечность текстиль-бетона, является величина и характер адгезии используемых волокон к минеральной матрице: модифицированному мелкозернистому бетону [27, 30, 72].

Первоначальное создание текстильно-армированного бетона (TRC) началось в 1980-х годах. Опыт создания и использования изделий на основе текстильно-армированного бетона (TRC), разработанного в 80-х годах прошлого века, показывает, что на свойства изделий в наибольшей степени оказывают влияние четыре фактора: качество бетона, взаимодействие между системой армирования и бетоном, количество используемых волокон и расположение текстильной арматуры внутри бетона.

Размер частиц заполнителя для бетона необходимо тщательно выбирать. Если бетон слишком крупный, он не сможет проникнуть через текстильную арматуру. Для достижения наилучших результатов следует использовать свежий бетон. Чтобы улучшить адгезию, можно дополнить бетон химическими добавками. Характерными особенностями TRC является способность сохранять высокую прочность на разрыв, которая достигается за счет применения длинных непрерывных волокон, сплетенных определенным образом в сетки или в линейные изделия.

Изделия из текстиль-армированного бетона могут быть тоньше изделий из традиционного бетона, армированного стальными стержнями или сетками. Типичная конструкция со стальной арматурой имеет толщину от 100 до 300 мм, тогда как конструкция TRC обычно имеет толщину 50 мм. Благодаря этой более тонкой структуре используется меньше материала, что положительно сказывается на экономии материалов и экономическом эффекте.

Области строительства, в которых текстильно-армированный бетон успешно применяется — это строительство мостов, обустройство тоннелей, формирование кровельных покрытий, в том числе для перекрытия больших площадей. Представляет интерес

применение композиционного вяжущего и использование технологии торкретирования при выполнении строительных конструкций [58, 59, 61]. Этот материал используется при создании архитектурных оболочек зданий и сооружений. В RWTH Aachen University (Германия) построен павильон с крышей из текстильного бетона. Крыша была спроектирована с использованием четырех частей TRC; каждая часть была тонкой и имела двойную кривизну в форме гиперболического параболоида (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Павильон в Аахене

Ремонт и реставрация железобетонных конструкций — это еще одна область доказанного применения TRC. Продление срока службы существующих конструкций за счет их усиления с помощью TRC предполагает снижение затрат на материалы и рабочую силу, необходимых для сноса этих конструкций с целью создания новых.

Текстиль-бетон можно изготавливать различными способами: литевым формованием на стендах или прокатом на конвейере, пултрузией, ламинированием и пр.

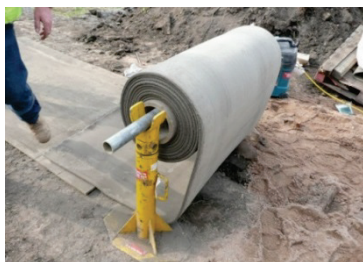
При изготовлении конструкции TRC ламинированием аналогично литевой технологии собирают форму или опалубку для укладки бетона и размещения текстиля. Далее бетон равномерно распределяется по основанию, а затем сверху укладывают ткань. Поверх ткани заливается второй слой бетона, и прикатывается ролик. Эти операции выполняют слой за слоем, пока высота изделия не достигнет необходимого размера.

При изготовлении конструкции TRC пултрузией ткань проталкивается через камеру инфильтрации суспензии, где ткань покрывается и пропитывается бетоном. Ролики вдавливают бетон в ткань для получения требуемой формы и размера изделия. Технологии ламинирования и пултрузии совместимы с аддитивными технологиями 3D-печати

Бетонное полотно представляет собой пропитанный бетоном гибкий тканевый материал, который в процессе взаимодействия с водой застывает и создает прочный, тонкий, стойкий к огню и воде слой бетона.

Стандартное бетонное полотно включает 3-мерные волокна в структуре, которые пропитываются созданной по особому рецепту сухой бетонной смесью. Благодаря особому расположению волокон ткани полотно после первого взаимодействия с водой становится водонепроницаемым. Первичная гидратация осуществляется методом распыления или полного погружения материала в воду.

После того как покрытие установлено, оно схватывается и создает прочный слой, не боящийся внешних воздействий и исключающий возможность распространения трещин. Бетонная ткань активно используется в гражданском и промышленном (даже военном) строительстве, позволяет улучшать рельеф и сохранять грунты от подвижек, защищать различные объекты, быстро и качественно сооружать здания и т. д. (рис. 1.2).



*а*



*б*



*в*



*г*

*Рис. 1.2.* Основные этапы укладки бетонного полотна:

*а* — размотка рулона; *б* — крепление бетонного холста к поверхности; *в* — фиксация полотен между собой; *г* — смачивание бетонного полотна

Бетонное полотно должно соответствовать следующим показателям: плотности порядка  $1420 \text{ кг/м}^3$ ; начало схватывания мелкозернистого бетона от 90 мин; прочности на разрыв — не менее  $20 \text{ кН/м}$ ; прочности на прокол от  $3 \text{ кН}$ ; прочности на сжатие не менее  $40 \text{ МПа}$ .

## **1.2. Мелкозернистый модифицированный бетон, армированный дисперсными волокнами**

Мелкозернистый бетон, модифицированный и армированный дисперсными волокнами различной природы, является основой для изготовления текстиль-бетона, для бетонных изделий, изготавливаемых методом 3D-печати, а также может быть основой для изготовления бетонного полотна.

Принципиальным отличием этих двух типов бетона являются следующие группы факторов. Во-первых, волокно для 3D-бетона должно быть мягким и его длина должна ограничиваться 1–2 мм, чтобы смесь беспрепятственно проходила через формирующую головку 3D-принтера. Во-вторых, смесь должна иметь ярко выраженные тиксотропные свойства. Смесь должна иметь высокую подвижность для ее беспрепятственного транспортирования (перекачивания) к формирующей головке и после укладки в конструкцию сохранять формостабильность, особенно при безопалубочных технологиях.

Эффективная работа текстиль-бетона как единого материала предполагает наличие сцепления на границе раздела между бетоном и армирующим волокном, а также между бетоном и текстильными сетками, выполняющими роль горизонтальной арматуры [54, 64, 71]. Прочность межфазной связи определяется свойствами волокон и прочностными характеристиками самого мелкозернистого бетона. Свойства волокон характеризуются их видом (материалом), формой, длиной и диаметром армирующих волокон, а также состоянием их поверхности.

Свойства текстильно-армированного бетона зависят также от количества слоев тканых или нетканых полотен и их размещения в теле бетона (схем армирования). Важным является также уровень предварительного напряжения полотен и объемного содержания волокон, что влияет на прочностные характеристики плиты из текстильного бетона.

В качестве армирующего компонента могут использоваться следующие группы волокон (а также сетки и полотна на их ос-

нове): углеродное волокно и ткань на основе углеродных волокон; металлическая фибра и стальные микроволокна; полимерные, стеклянные, базальтовые волокна и ткани на их основе; гибридные волокна.

С целью снижения энергетических потерь и с учетом экологических проблем в составе мелкозернистого бетона могут использоваться переработанные отходы: тонкомолотый строительный лом в качестве мелкого заполнителя и активного наполнителя бетонных смесей, а также волокна на основе стали, получаемой из металлического лома (волокна RSF); химически модифицированного доменного шлака и пр.

Бетоны, армированные стальной фиброй или стальными микроволокнами, используются в течение многих десятилетий из-за его способности задерживать трещины и придавать пластичность конструкционному бетону. Цементные смеси, армированные вторичной стальной фиброй, в свежем и затвердевшем состоянии ведут себя иначе, чем обычные и промышленные цементные смеси, армированные стальной фиброй.

Текстильный армированный бетон изготавливают также с применением углеродной ткани или тканей на основе стеклянного или базальтового волокна (бетоны TRC). Использование TRC позволяет строить тонкие и легкие конструкции с повышенной прочностью из-за отсутствия проблем с коррозией.

Применение углеродного тканого текстиля с размером ячеек от 0 до 20 мм как армирующей основы в мелкозернистом бетоне показало, что прочность на изгиб и ударная вязкость образцов увеличились более чем на 38 % и 82 %, соответственно, за счет уменьшения размера ячеек текстиля с 20 до 2 мм. При использовании текстиля с размером ячеек, равным нулю, характеристики оказались слабее из-за уменьшения проникновения цементной матрицы в текстильную структуру. При использовании тканей с разными размерами ячеек, но с одинаковым объемным содержанием было обнаружено, что размер ячеек в текстиле, в отличие от объемного содержания, не является доминирующим фактором в поведении TRC при изгибе.

Каменные конструкции, усиленные текстильно-армированным бетоном (TRC), были тщательно изучены, и многие результаты подтвердили эффективность, усиленную TRC из базальтового волокна. Образцы, ограниченные TRC из углеродного стекла, показали лучшую пластичность по сравнению с TRC

из базальтового стекла, поскольку в этом испытании наблюдалась относительно низкая способность к диспергированию трещин для образцов, ограниченных TRC из базальтового стекла.

Текстильно-армированный бетон (TRC) с дополнительным армированием базальтовым или стальным волокном может использоваться как нагружаемый элемент конструкции. Добавление рубленых стальных волокон в матрицу положительно влияет на изгибное напряжение первой трещины, прочность на изгиб, а также жесткость и ударную вязкость после растрескивания. Текстильно-армированный бетон (TRC) становится альтернативой металлическому армированию, в которой коррозия больше не является проблемой.

Новое композитное волокно было изготовлено из химически модифицированного доменного шлака, широко использовалось в строительстве в Китае, но связанное с ним поведение при растворении было неясным. Стойкость волокон в агрессивных средах варьировалась изменением его кислотности за счет добавления базальта в диапазоне от 0,93 до 1,19.

В мелкозернистых бетонах традиционно применяют волокна (и сетки) на основе полипропилена (PP), полиэтилена (PE) и поливиниловых спиртов (PVA). Для наружного укрепления бетонных конструкций применяют лен-эпоксидные композиты мокрой укладкой, которые изготавливают с использованием основы различного веса и льняной ткани, а также двунаправленной стеклоткани.

Применение гибридных систем армирования с волокнами, тканями или сетками различной основы является перспективным направлением развития технологий текстиль-бетона и бетонных полотен. Введение гибридного волокна незначительно влияет на прочность на сжатие, но может улучшить прочность на изгиб до 28 %. Стальные волокна в гибридных смесях ослабляют положительное влияние полиолефиновых волокон на коррозионные характеристики бетона. Волокна PWS (steel fiber + polyolefin fiber) оказывают такое же влияние на удобоукладываемость, как стальное волокно с аналогичными характеристиками волокна, однако могут приводить к более высокой вязкости.

Одним из путей модификации минеральной матрицы является использование в составе бетона побочных продуктов других производств и вторичного (разрушенного) бетона. Минеральные вещества, получаемые из отходов, могут исполь-

зоваться в качестве мелкого заполнителя, а также активного или инертного наполнителя; синтетические — в качестве модифицирующих добавок; зола органических отходов — в качестве активной добавки. Реализуются решения по применению бетонных смесей, содержащих переработанный крупнозернистый заполнитель (RCA) и переработанный мелкозернистый заполнитель (RFA) в качестве частичной замены (0 % и 30 %) заполнителей (гравий и песок) и MWG в качестве частичной замены (0 % и 30 %) цемента.

Применение для замены мелкого заполнителя (речного песка) высушенных квасцов в композиции с карьерной или известняковой пылью в качестве инертных промышленных отходов улучшило плотность бетона, прочность на сжатие, изгиб и растяжение. Оптимальное содержание мелкозернистого заполнителя промышленными отходами составляло 10 % для высушенного в печи квасцового шлама и 15 % для карьерной и известняковой пыли.

Развиваются технологии геополимерного бетона (GPC), в том числе возможности использования зол различных природных материалов (биомассы из сельскохозяйственных отходов) в качестве дополнительных вяжущих материалов или замены заполнителя в бетоне. Исследовано влияние замены крупного заполнителя сельскохозяйственными и промышленными отходами, такими как печной шлак, скорлупа масличной пальмы, скорлупа кокосового ореха, отходы керамической плитки, стекло, пенополистирол, легкий керамзитовый заполнитель и переработанный заполнитель для бетона, на свежие, затвердевшие и долговечные свойства бетона [63, 69, 76].

Исследования возможности утилизации различных промышленных и сельскохозяйственных отходов в производстве мелкозернистого бетона продемонстрировали целесообразность использования гранулированного доменного шлака (GBFS) и метакрилина (МК) в качестве замены части клинкерного цемента. Активные источники кремнезема, такие как микрокремнезем (SF) и зола рисовой шелухи (RHA), использовались в качестве частичной замены песка. Бетон, содержащий GBFS (GS-AAC), показал более высокие механические свойства по сравнению с МК (МК-AAC). Образцы, содержащие 2,5 мас. % RHA и 7,5 мас. % SF, показали самые высокие механические свойства по сравнению с образцами, содержащими кварцевый песок.

Исследованиями установлена возможность использования в составе гидравлического вяжущего тонкомолотых горных пород вулканического происхождения, а также отходов производства вяжущих и специально переработанных отходов производства бетона и вторичного бетона, получаемого в результате реновации жилья. Эти материалы в той или иной степени проявляют гидравлическую активность, а также в тонкомолотом виде являются дополнительными центрами кристаллизации новообразований при схватывании и твердении вяжущего. Гидравлическая активность излившихся горных пород вулканического происхождения обусловлена их пуццолановой активностью (проявляющуюся по поглощению CaO от 60 до 300 мг/г), возможностью проявления свойств цеолитов, а для вторичного бетона — наличием зерен непрореагировавшего гидравлического вяжущего, которые (зерна и конгломераты) открываются в результате предварительной очистки и рафинирования и тонкого измельчения (до удельной поверхности 450–500 м<sup>2</sup>/кг) элементов вторичного бетона.

### **1.3. Структура мелкозернистого бетона**

Мелкозернистые бетоны являются одним из распространенных и достаточно часто применяемых видов тяжелого бетона на плотных заполнителях или легкого бетона на пористых заполнителях, а также газобетона. Особенности структуры и гранулометрического состава позволяют использовать эти материалы для изготовления пустотных блоков, камней и плитки для дорожной одежды, при изготовлении специальных конструкций, а также в условиях дефицита качественных крупных заполнителей.

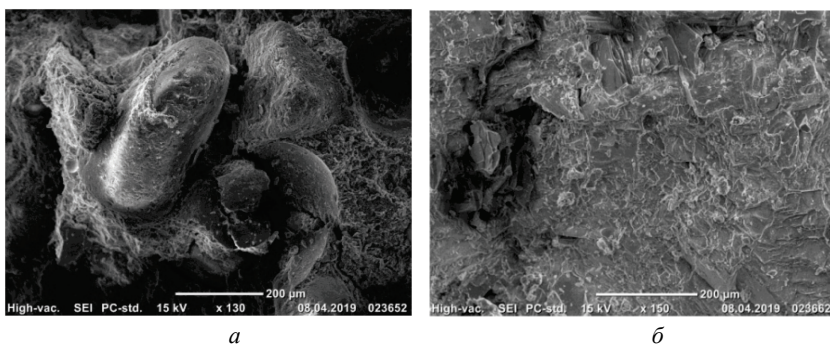
В зависимости от условий применения и требований, предъявляемым изделиям, может осуществляться модификация структуры различными минеральными, полимерными и нано добавками, позволяющими оптимизировать прочностные характеристики, повышать водонепроницаемость и стойкость к агрессивным веществам [78, 81, 84].

Повышение качества мелкозернистого модифицированного бетона как матрицы бетонного полотна основано на реализации следующих принципов. Во-первых, достижение наибольшей плотности матрицы с минимизацией межзернового пространства. Во-вторых, обеспечение технологических приемов внут-



ренного ухода за твердеющей бетонной смесью при водоцементных отношениях близких к оптимальным.

Минимизация межзернового пространства достигается использованием фракционированного мелкого заполнителя (как правило, используется дискретный ряд мелкого заполнителя), а также за счет применения пластифицирующих добавок. Отметим, что существуют опробированные методики расчета плотных упаковок в зависимости от используемых фракций заполнителя от крупного песка до соразмерных по удельной поверхности минеральному вяжущему. Микроструктура образцов бетонного камня представлена на *рис. 3*.



*Рис. 1.3.* Микроструктура образцов бетонного камня:

*a* — речной песок; *б* — дробленный песок

Как уже отмечалось, важным для получения изделий с высокой прочностью является обеспечение внутреннего ухода за твердеющей бетонной смесью. Одним из преимуществ текстиль-бетонов является их меньшая толщина по сравнению с классическим железобетоном, позволяющая получать изделия с равными или лучшими прочностными характеристиками. При этом для тонких изделий при их твердении проявляются в значительной степени две опасности: это усадка на ранних стадиях твердения, обуславливающая возможность возникновения трещин и деформации в результате самоусыхания цементного камня [35, 81, 86].

Причиной этих явлений является дефицит влаги, образующийся в результате гидратации клинкерных минералов, отрицательное давление в капиллярах, что ведет к их сжатию

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)