

На правах рукописи



СТОЛЕТОВА ИРИНА АЛЕКСАНДРОВНА

**МЕЛКОЗЕРНИСТЫЕ БЕТОНЫ
НА КОМПОЗИЦИОННОМ ВЯЖУЩЕМ С МИНЕРАЛЬНОЙ
ДОБАВКОЙ ВЫВЕТРЕННЫХ КВАРЦИТОПЕСЧАНИКОВ
ДЛЯ МАЛЫХ АРХИТЕКТУРНЫХ ФОРМ**

2.1.5 Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Белгород – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
член-корр. РААСН
Лесовик Валерий Станиславович

Официальные оппоненты: **Лукутцова Наталья Петровна**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Брянский государственный
инженерно-технологический университет»,
заведующий кафедрой «Промышленное и
гражданское строительство»

Шведова Мария Александровна
кандидат технических наук,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет», ст. науч. сотр.
научно-образовательного академического
центра строительного материаловедения

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский Московский
государственный строительный
университет»

Защита состоится «26» декабря 2025г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.276.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. 214.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова» и на сайте https://gos_att.bstu.ru/dis/Stoletova.

Автореферат разослан «22» октября 2025 г

Ученый секретарь
диссертационного совета



Суслов Денис Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Мелкозернистые бетоны в современной стройиндустрии широко применяются для изготовления малых архитектурных форм (МАФ). Это связано с сочетанием функциональности, эстетичности и экономической эффективности данного вида бетонов.

Отличительные свойства мелкозернистого бетона, такие как удобоукладываемость, заполняющая способность и сопротивление сегрегации, позволяют создавать архитектурные изделия сложной геометрии с возможностью эксплуатации на открытом воздухе.

Передовыми способами получения сложных декоративно-функциональных архитектурных объектов являются аддитивные и литьевые технологии, которые, для эффективной практической реализации, требуют разработки бетонов нового уровня.

В этой связи, актуальным является повышение эффективности мелкозернистых бетонов для современных методов производства изделий за счёт использования композиционных вяжущих (КВ) на сырье, подготовленном геологическими процессами, таком как выветренные кварцитопесчаники (ВКВП) Курской магнитной аномалии (КМА).

Работа выполнялась при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 25-19-00866).

Степень разработанности темы. Решению проблемы комплексного использования нерудного сырья КМА посвящены многие исследования, но, при утверждении запасов попутнодобываемых пород в государственной комиссии по запасам, ВКВП не вошли в число полезных ископаемых. При этом известны сведения о том, что породы разных стадий выветривания и зеленосланцевой степени метаморфизма требуют меньшей энергии для разрушения, а поверхность частиц имеет большее количество активных центров для взаимодействия с минералами цементного клинкера. Изучение возможности применения подобных пород как минеральной добавки для бетонов ранее не проводилось.

Цель работы. Разработка научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего получение мелкозернистых бетонов для МАФ с улучшенными свойствами за счёт применения ВКВП в качестве компонента КВ.

Для достижения поставленных целей решались **следующие задачи:**

- на основе исследования минерального состава и физико-механических характеристик оценить перспективность использования ВКВП в качестве активного компонента в КВ;
- исследование влияния ВКВП на процессы структурообразования КВ;
- разработка КВ для получения широкой номенклатуры мелкозернистых бетонов;
- разработка рецептур и технологии приготовления мелкозернистых бетонов на основе КВ с использованием ВКВП для получения изделий различного назначения;

- подготовка нормативных документов для реализации теоретических и экспериментальных исследований и промышленной апробации.

Научная новизна. Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение КВ с требуемыми эксплуатационными характеристиками для мелкозернистых бетонов, способствующее повышению прочностных показателей при снижении доли цемента. Использование минеральной добавки из подготовленного геологическими процессами ВКВП, предварительно молотого в вибромельнице с последующим смешением полученного порошка с цементом (ПЦ) в соотношении (по массе) ВКВП:ПЦ равном 1:4 приводит к повышению активности КВ с использованием ВКВП на 13% по сравнению с ПЦ. При увеличении удельной поверхности ВКВП до значений $S_{уд}=1000 \text{ м}^2/\text{кг}$ и соотношении (по массе) ВКВП:ПЦ равном 1:9 показатели активности КВ с использованием ВКВП повышаются на 19% по сравнению с ПЦ. Применение КВ с минеральной добавкой ВКВП позволит получить широкую номенклатуру мелкозернистых бетонов для МАФ: самоуплотняющийся бетон на белом цементе ПЦБ 1-500-ДО (9% ВКВП), самоуплотняющийся фибробетон на портландцементе ЦЕМ I 42,5 Н (9% ВКВП), бетон для 3D-аддитивного производства на портландцементе ЦЕМ I 42,5 Н (20% ВКВП).

Установлен характер влияния минеральных добавок ВКВП (9% и 20%) на свойства смеси и процессы структурообразования мелкозернистых бетонов. Установлена зависимость активности КВ с минеральной добавкой тонкомолотого ВКВП от удельной поверхности и расхода данной добавки. При $S_{уд}=500 \text{ м}^2/\text{кг}$ расход ВКВП составляет 20%; при $S_{уд}=1000 \text{ м}^2/\text{кг}$ расход ВКВП - 9%. Введение минеральной добавки ВКВП обеспечивает уплотнение микроструктуры цементной матрицы и макроструктуры композита при экономии цемента, что позволяет получить визуально привлекательные МАФ для улучшения качества архитектурно-градостроительной среды. Данные факты объясняются процессами дополнительного структурообразования за счет связывания выделяющейся при гидратации клинкерных минералов СаО аморфным кремнеземом, присутствующим в ВКВП, и синтеза гидросиликатов кальция второй генерации.

Предложена феноменологическая модель структурообразования мелкозернистых бетонов на основе КВ с минеральной добавкой ВКВП, обусловленная формирующейся уплотненной структурой и повышенной адгезией цементной матрицы мелкозернистого бетона с минеральной добавкой ВКВП, на развитой поверхности которой формируются тонкие пленки гидратных фаз, взаимодействие с которыми приводит к упрочению контактной зоны между минеральной добавкой и цементным камнем.

Теоретическая и практическая значимость работы. Дополнены теоретические представления об энергосберегающих технологических процессах и методах создания мелкозернистых бетонов; управлении процессами структурообразования при использовании КВ с минеральной добавкой горных пород, подготовленных геологическими процессами, и мелкого заполнителя из

отсева дробления кварцитопесчаника (КВП) зеленосланцевой степени метаморфизма, позволяющие получать мелкозернистые бетоны с высокими эксплуатационными характеристиками.

Разработана технология получения КВ с показателями активности 62,1-69 МПа при замене 20% и 9% цемента на минеральную добавку ВКВП, полученную путем помола в вибромельнице.

Предложены составы смесей для получения самоуплотняющегося мелкозернистого бетона для МАФ при использовании КВ с минеральной добавкой ВКВП:

- мелкозернистый бетон на белом цементе ПЩБ 1-500-ДО с минеральной добавкой ВКВП (9%) и мела (7%) со следующими показателями: класс В30, марка по морозостойкости F150;

- мелкозернистый фибробетон на портландцементе ЦЕМ I 42,5 Н с минеральной добавкой ВКВП (9%) и стеклофибры (3%) со следующими показателями: класс В35, марка по морозостойкости F200.

Разработан состав смеси для получения мелкозернистого бетона для 3D-аддитивного производства на портландцементе ЦЕМ I 42,5 Н с минеральной добавкой ВКВП (20%) и мелкого заполнителя из отсева дробления КВП зеленосланцевой степени метаморфизма со следующими показателями: класс В30, марка по морозостойкости не менее F100.

На основании выполненных исследований показана возможность использования подготовленных геологическими процессами ВКВП в качестве сырья для производства строительных композитов.

Методология работы и методы исследований. Методология работы основывается на трудах отечественных и зарубежных исследователей по тематике, связанной с получением КВ и изделий на их основе. При выполнении исследований применялось современное высокотехнологичное оборудование, методы исследований и испытаний, регламентированные отечественными и зарубежными нормативными документами, методы математического планирования эксперимента и обработки его результатов. Экспериментальные исследования и оценка свойств исходных материалов, КВ и бетонов на их основе, осуществлялись методами электронной микроскопии, качественного и количественного рентгенофазового анализа, методом воздухопроницаемости при определении удельной поверхности, методами определения усадки и реотехнологических характеристик, физико-механических методов испытаний строительных материалов. Для определения растекаемости смесей были проведены измерения диаметра расплыва конуса по Суттарду.

Положения, выносимые на защиту:

- технологическое решение, обеспечивающее получение КВ с требуемыми эксплуатационными характеристиками для мелкозернистых бетонов;

- характер влияния минеральных добавок ВКВП на свойства смеси и процессы структурообразования мелкозернистых бетонов;

- феноменологическая модель структурообразования мелкозернистых бетонов на основе КВ с минеральной добавкой ВКВП;

- технология получения КВ с использованием в качестве минеральной добавки ВКВП, полученного путем помола в вибромельнице;
- составы смесей для получения самоуплотняющегося мелкозернистого бетона и мелкозернистого бетона для 3D-аддитивного производства на КВ с применением минеральной добавки ВКВП.

Степень достоверности результатов работы обеспечена системой проведенных исследований с использованием сертифицированного и метрологически поверенного современного лабораторного оборудования, а также стандартных средств измерений и методов научных исследований. Полученные результаты не противоречат общепризнанным научным фактам и работам других авторских коллективов. Полученные результаты апробированы в полупромышленных условиях.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены на следующих научно-технических конференциях: Международная научно-практическая конференция, посвященная 65-летию БГТУ им. В. Г. Шухова: Научные технологии и инновации (XXIII научные чтения) (Белгород, 2019); Международная научная конференция "Industrial and Civil Construction 2022" (Белгород, 2022); «Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова», посвященная 300-летию Российской академии наук (Белгород, 2022); IX Всероссийская научно-практическая конференция «Инженерное дело на Дальнем Востоке России» (Владивосток, 2024).

Внедрение результатов исследований. Выпуск опытно-промышленной партии мелкозернистого бетона для 3D-аддитивного производства выполнялся на предприятии Белгородской области ООО «КЕЙКОД». Также с фирмой ООО «КЕЙКОД» подписан акт производства стелы из мелкозернистого бетона на основе КВ с минеральной добавкой тонкомолотого ВКВП и мелкого заполнителя из отсева дробления КВП и протоколы о внедрении вышеизложенных исследований при изготовлении МАФ в Белгороде и в Екатеринбурге.

С АНО "Центр содействия строительства Белгородской области" был подписан протокол о намерениях использования уличных светильников из самоуплотняющегося мелкозернистого бетона на КВ с минеральной добавкой ВКВП в качестве МАФ на территории «Белого квартала» в Белгороде.

Компании по производству и продаже бетона в Китае, Ираке и Саудовской Аравии заинтересовались результатами исследований диссертационной работы и подписали протоколы о намерениях использования данных научных разработок по мелкозернистым бетонам с заменой части портландцемента на тонкомолотые минеральные добавки при производстве МАФ.

На основании выполненных исследований подготовленные геологическими процессами ВКВП отнесены в разряд полезных ископаемых, о чем подписан протокол о намерениях с представителями геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова.

В рамках внедрения результатов работы разработаны: технологический регламент и стандарт организации СТО 02066339-076-2024 на производство

мелкозернистого бетона на основе КВ с использованием ВКВП и мелкого заполнителя из отсева дробления КВП для 3D-аддитивного производства.

Теоретические положения диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке студентов бакалавриата, обучающихся по направлению 08.03.01 «Строительство» образовательной программы «Производство строительных материалов, изделий и конструкций» и магистратуры, обучающихся по направлению 08.04.01 «Строительство» образовательной программы «Эффективные композиты для зеленого строительства» в рабочей программе «Технологии эффективных композитов для зеленого строительства».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, в том числе 3 статьи в центральных рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Личный вклад автора. Состоит в обосновании рабочей гипотезы и научной идеи, постановке цели и задач исследования, в анализе теоретических данных по проблеме исследования, в планировании и реализации экспериментов, анализе и обобщении результатов исследований, формулировке научной новизны, выводов, положений прикладных решений и разработок. Принято участие в апробации и внедрении результатов исследования.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, приложений и списка литературы из 152 наименований. Работа изложена на 163 страницах, включает 44 рисунка и 29 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность диссертации, определена цель и задачи, сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость, изложены методология и методы исследований; положения, выносимые на защиту, приведены сведения о достоверности, апробации и результатах внедрения, структуре и объеме работы.

В **первой главе** представлен обзор теоретической базы и мировой практики применения декоративного мелкозернистого бетона для МАФ в стройиндустрии; рассматривается роль архитектуры и дизайна, производства и качества энергосберегающих строительных материалов, а также применения сырья, подготовленного геологическими процессами, в формировании городской среды. **Рабочая гипотезой** научной работы стало предположение о том, что ВКВП зеленосланцевой степени метаморфизма требуют меньшей энергии для помола при получении минеральных добавок, а поверхность их частиц имеет большее количество активных центров, что приводит к улучшению процессов структурообразования композитов. Данный факт дает возможность повысить физико-механические характеристики получаемого бетонного композита и снизить расход цемента.

Во **второй главе** приведены методы исследования и характеристики сырьевых материалов: белый цемент ПЦБ 1-500-ДО ГОСТ 965-89, портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н АО «Себряковцемент» (ГОСТ 31108-2016), отсев

дробления кварцитопесчаника КМА (КВП), ВКВП КМА, гиперпластификатор Реопласт ПКЭ-1230, добавка Линамикс –ПК, мел МТД-1, кварцевый песок Безлюдовского месторождения, стеклофибра (ТСК «Эко-плюс»).

В третьей главе описаны способы получения КВ для мелкозернистого бетона с использованием ВКВП - попутнодобываемых пород КМА. По основным физико-механическим свойствам эта порода не соответствует нормативным документам для получения щебня, поэтому она не внесена в сырьевую базу и ее запасы не утверждены Государственной комиссией по запасам полезных ископаемых. При выветривании происходит разрушение текстуры и структуры исходных горных пород, а также кристаллической решетки породообразующих минералов, за счет целого комплекса гипергенных процессов. Визуально породы КВП характеризуются средне- и мелкозернистым сложением. При этом ВКВП отличается сахаровидным обликом с розовато-серой окраской, поверхность кварца покрывается сетью параллельных микротрещин, вследствие чего кремнезем легко подвергается растворению и переотложению в виде аморфных корочек, что подтверждается данным РФА (рисунок 1).

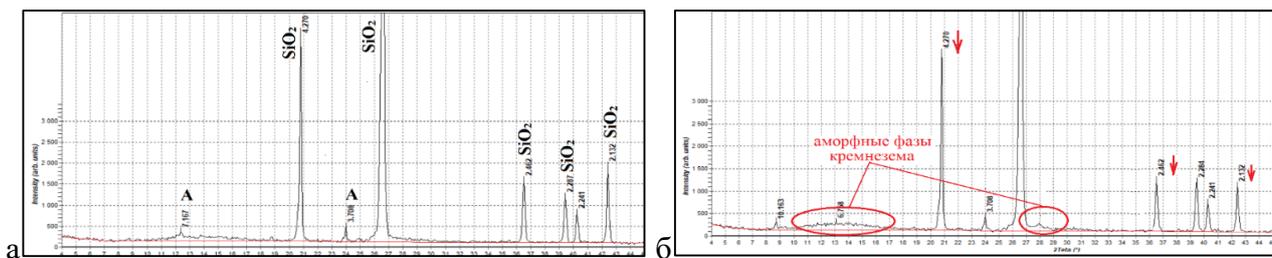


Рисунок 1 – Рентгенограммы кварцитопесчаников:

а – незатронутый процессами выветривания; б – выветренный кварцитопесчаник.

Процессы выветривания оказывают положительное влияние на кинетику помола КВП, значительно снижая энергоемкость. При этом, на основании изучения эффективности помольного оборудования (шаровая, вихревая и вибромельница) установлено, что наиболее эффективным является изготовление минеральной добавки ВКВП в вибромельнице. Поэтому КВ получали путем добавления 20% молотого ВКВП в предварительно размолотый цемент ЦЕМ I 42,5 Н (нормальная густота цементного теста 26,7 %) до удельной поверхности 500 и 700 м²/кг. Минеральная добавка ВКВП вводилась размолотой до удельной поверхности 300,500 и 700 м²/кг. (таблица 1).

Установлено, что активность КВ с заменой 20% цемента на минеральную добавку ВКВП на 13% выше прочности ПЦ и на 17% выше по сравнению с минеральной добавкой на основе НКВП. Анализ показателей активности вяжущих с 20% ВКВП в составе показал, что увеличение удельной поверхности минеральной добавки ВКВП до 700 м²/кг является нецелесообразным с точки зрения энергоемкости процесса, поскольку не приводит к существенному возрастанию активности вяжущих. Поэтому, наиболее рациональными по показателям приняты вяжущие с 20% ВКВП в составе ($S_{уд} = 500$ м²/кг), что подтверждается исследованием микроструктуры (рисунок 2). В научном исследовании полученные КВ использованы в разработке мелкозернистого

бетона для 3D-аддитивного производства на портландцементе ЦЕМ I 42,5 Н с минеральной добавкой ВКВП (20%) и мелкого заполнителя из отсева дробления КВП зеленосланцевой степени метаморфизма.

Таблица 1 – Влияние кварцевого сырья на активность композиционного вяжущего

№ п/п	Состав (вяжущее)	Удельная поверхность, м ² /кг		Активность вяжущего, МПа	
		ПЦ*	КВП*	НКВП*	ВКВП
1	КВ20	500	300	46,9	49,1
			500	54,1	57,5
			700	55,5	58,5
2	КВ20	700	300	58,3	60,7
			500	59,8	62,1
			700	59,2	65,5
3	КВ50	500	300	32,6	34,3
			500	46,5	49,2
			700	45,0	50,3
4	КВ50	700	300	49,5	50,3
			500	52,3	53,4
			700	52,9	53,8
5	ПЦ	300	-	55,2	

Примечание: КВ20 (50) – замена цемента на 20 и 50 % кварцитопесчаником;

ПЦ – портландцемент; КВП – кварцитопесчаник; НКВП – неветренный кварцитопесчаник

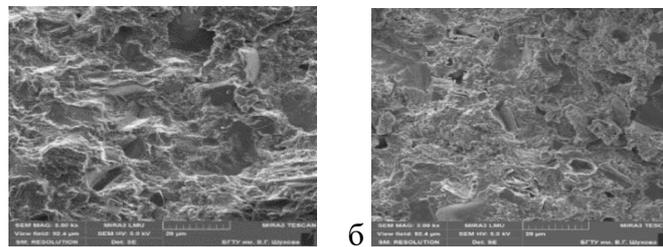


Рисунок 2 – Микроструктура цементного камня в 28-суточном возрасте:

a – с использованием ВКВП;

б – с использованием КВП, незатронутого процессами выветривания

Цементный камень с использованием ВКВП имеет более плотную структуру за счет наличия аморфных минеральных фаз кварца, которые приводят к активному протеканию процессов структурообразования путем связывания СаО, выделяющегося при гидратации клинкерных минералов с образованием гидросиликатов кальция второй генерации.

Далее установлена зависимость характеристик активности цементных систем с минеральной добавкой тонкомолотого КВП от расхода минеральной добавки (7-13%) при $S_{уд}=1000$ м²/кг с различным характером нарастания показателей при использовании ВКВП и НКВП.

Результаты исследований показали, что для составов мелкозернистого самоуплотняющегося бетона на белом цементе ПЦБ 1-500-ДО и мелкозернистого самоуплотняющегося фибробетона на портландцементе ЦЕМ I 42,5 Н наиболее рациональным будет использование КВ с заменой части цемента на 9% минеральной добавки ВКВП ($S_{уд}=1000$ м²/кг), полученного в

вибромельнице, с последующим смешением с немолотым цементом. Данные образцы обладают более высокими показателями активности за счет меньшего содержания пылевидных фракций, повышающих водопотребность бетона, и более рациональным соотношением частиц разных фракций, служащих центрами кристаллизации новообразований, что в целом способствует уплотнению композита и увеличению его прочности (таблица 2). С учетом вышеизложенного разработана широкая номенклатура КВ для мелкозернистых бетонов различного назначения.

Таблица 2 – Свойства вяжущих с использованием минерального наполнителя различного вида

№	ПЦ %	КВП,		НГ, %	Сроки схватывания, мин		ρ , кг/м ³	Активность вяжущего, МПа		
		вид	%		начало	конец		7	28	ТВО
0	100	–	-	26,7	90	270	2310	45,9	58,2	51,0
Помол КВП (или ВКВП) в вибрационной мельнице										
1	94	С	7	28,8	94	263	2130	48,0	60,1	52,8
		В		29,7	97	255	2135	48,5	64,2	59,0
2	91	С	9	30,1	95	250	2133	42,0	61,2	54,0
		В		31,2	97	248	2139	58,0	69,0	63,0
3	88	С	11	31,4	102	274	2137	49,0	55,0	50,0
		В		32,3	104	264	2140	51,0	59,0	53,0
4	85	С	13	32,8	112	297	2138	44,0	50,0	46,0
		В		33,2	119	277	2141	43,0	52,0	50,0
Помол КВП (или ВКВП) в струйной вихревой мельнице										
1*	94	С	7	29,8	97	273	2125	51,0	58,0	49,0
		В		31,1	101	265	2128	55,0	60,0	54,0
2*	91	С	9	31,9	108	293	2129	43,0	56,0	50,0
		В		32,8	112	285	2133	45,0	57,0	54,0
3*	88	С	11	32,7	115	303	2131	45,0	52,0	45,0
		В		33,2	117	305	2140	49,0	54,0	55,0
4*	85	С	13	34,8	122	309	2137	43,0	52,1	45,0
		В		35,5	123	315	2138	44,0	52,8	47,0

Примечание: С-свежий КВП; В-выветренный КВП; ТВО – тепловлажностная обработка; НГ – нормальная густота

В четвертой главе приводятся данные разработки составов широкой номенклатуры мелкозернистых бетонов, которые благодаря идеальному сочетанию практичности и визуальной привлекательности стали незаменимыми в современном дизайне. Мелкозернистые самоуплотняющиеся бетоны для МАФ на белом цементе получали путем использования КВ с минеральной добавкой ВКВП, суперпластификаторов и мела. Для определения рационального соотношения добавок было проведено математическое планирование. Матрица планирования, на основании которой выполнялись экспериментальные исследования представлена в таблице 3.

На основании результатов математической модели были разработаны составы самоуплотняющихся мелкозернистых бетонов на белом цементе

(ПЦБ 1-500-ДО) с заменой части портландцемента на минеральную добавку из ВКВП и мела (таблица 4).

Таблица 3 – Условия планирования эксперимента

№	Кодированный вид	Натуральный вид	Диапазон варьирования			Шаг варьирования
			-1	0	1	
1	X1	Расход тонкомолотого ВКВП, %	7	9	11	2
2	X2	Расход добавки тонкомолотого мела, %	5	10	15	5
3	X3	Расход гиперпластификатора, %	0,8	1,1	1,6	0,4

Таблица 4 – Свойства мелкозернистых бетонов в зависимости от составов

Компонент	Составы		
	Контрольный Состав 1	Состав 2	Состав 3
Цемент белый ПЦБ 1-500-ДО ГОСТ 965-89, кг/м ³	550	550	457
ВКВП, кг/м ³	–	49,5	49,5
ТМ, кг/м ³	-	38,5	38,5
ГП, кг/м ³	6,05	6,05	6,05
Песок, кг/м ³	1265	1171,5	1265
Вода, кг/м ³	192,5	192,5	192,5
<i>Физико-механические характеристики</i>			
РК, см	69	65	64
T500	4,1	3,6	3,8
Плотность, кг/м ³	1905	1995	1980
Предел прочности при сжатии, 28 сут МПа	38,8	42,9	39,4
Предел прочности на растяжение при изгибе, 28 сут МПа	6,1	6,7	6,5
Морозостойкость	F 150	F150	F 150

Примечание: ТМ - тонкодисперсный мел МТД-1; ГП – гиперпластификатор; РК – расплыв конуса, T500 - время растекания смеси до достижения диаметра 500 мм

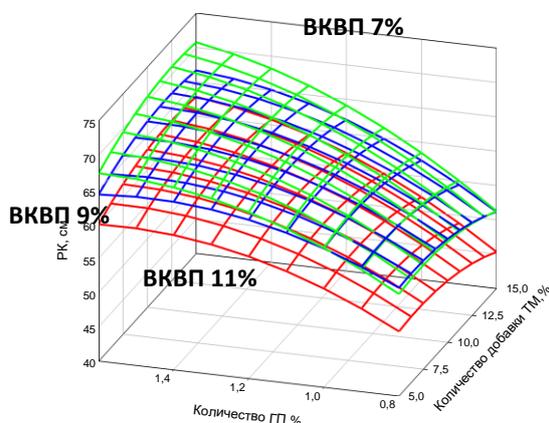


Рисунок 3 – Общая номограмма зависимости расплыва конуса смеси на БЩ от количества наполнителей

Важную роль в применении самоуплотняющихся бетонов играет их подвижность (рисунок 3).

По сравнению с цементным камнем из цемента контрольного состава в продуктах гидратации КВ с добавками ТМ 5 –7,5 %, ВКВП – 9 %, ГП 1–1,1 % содержится меньше гидроксида кальция в свободном состоянии. Это указывает на более полное связывание гидроксида кальция с возникающими новообразованиями и более высокое

содержание в них гидратной воды, что способствует повышению плотности цементного камня и его коррозионной стойкости. Данный факт подтверждается

данными РФА. Степень гидратации вяжущего оценивалась по изменению интенсивности линий основных минералов (C_3S); (C_3S , C_2S) и линий продуктов гидратации, в частности портландита.

Таким образом установлено, что при расходе добавок ТМ 5 –7,5 %, ВКВП –10 %, ГП 1–1,1 %, достигается расплыв конуса 61–63 см и обеспечиваются максимальные показатели активности. При этом создаются условия для формирования плотной и прочной структуры бетона в результате снижения капиллярной пористости путем распределения частиц наполнителей, имеющих различную структуру и геометрические размеры между собой и частицами цемента, а также, за счет реакций взаимодействия наполнителей с минералами цемента с образованием низкоосновных гидросиликатов кальция и, как следствие, получения прочного конгломерата. Возрастание прочности бетонов при введении в их состав минеральных добавок также связано с тем, что наиболее мелкие зерна последних образуют центры кристаллизации в цементной системе.

Далее, с целью расширения областей применения ВКВП и получения изделий различного назначения на основе КВ с использованием данной минеральной добавки, в работе разработаны самоуплотняющиеся мелкозернистые фибробетоны для ограждающих архитектурных конструкций с добавлением стеклянной фибры. Для определения оптимального количества вводимой фибры были заформованы образцы-балочки 4×4×16 см с соотношением компонентов вяжущее:песок = 1:3, В/Ц 0,35 на цементе с количеством фибры 1,5;3;4,5% по массе (составы 1-3). Результаты физико-механических испытаний образцов-балочек приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Физико-механические свойства бетонов в зависимости от расхода фибры

NN серий образцов	Волокна		Предел прочности при сжатии		Предел прочности на растяжение при изгибе	
	длина, мм	% по массе	величина, МПа	прирост, %	величина, МПа	прирост, %
Без волокон	-	-	33,0	-	5,6	-
Состав 1	30	1,5	37,1	12,4	6,2	10,7
Состав 2	30	3,0	37,8	14,6	7,1	26,8
Совтав 3	30	4,5	34,8	5,5	6,8	21,4

Оптимальный процент армирования составил 3 % по объему, при котором прирост прочности был максимальным и составил 14,6 % для прочности на сжатие и 26% – для прочности при растяжении. На основании полученных показателей были рассчитаны составы стеклофибробетона. Результаты испытаний разработанных составов представлены в таблице 6.

Анализ полученных результатов показал увеличение прочности бетонов обоих составов по сравнению с контрольным, несмотря на сокращения количества цементной составляющей в составе 3. Прирост прочности бетона по сравнению с бетоном без фибры составил 23 % и 11 % – для прочности при

сжатии и 34% и 29 % – для прочности на растяжение при изгибе, для состава 2 и 3, соответственно.

Таблица 6 – Свойства мелкозернистых фибробетонов в зависимости от составов

Компонент	Составы		
	Контрольный Состав 1	Состав 2	Состав 3
ЦЕМ I 42,5 Н	540	540	486
ВКВП, кг/м ³	–	48,6	48,6
Гиперпластификатор, кг/м ³	5,9	5,9	5,9
Песок, кг/м ³	1620	1566	1620
Вода, кг/м ³	189	189	189
Фибра, кг/м ³	–	12	12
<i>Физико-механические характеристики</i>			
РК, см	67	62	60
T500	3,9	4,5	4,7
Плотность, кг/м ³	2210	2250	2235
Предел прочности при сжатии, 28 сут МПа	36,1	45,8	40,2
Предел прочности на растяжение при изгибе, 28 сут МПа	5,8	7,8	7,5
Морозостойкость	F 150	F200	F 150

Далее были разработаны мелкозернистые бетоны для 3D-аддитивного производства МАФ на основе КВ с минеральной добавкой ВКВП. Для оптимизации реологических показателей мелкозернистых смесей под требования строительной печати, на основании ранее выполненных разработок и предварительных исследований была применена комбинация пластифицирующей (Линамикс ПК) и воздухововлекающей (Полипласт Аэро) добавок. Были заформованы образцы-кубы размером 7х7х7 см. Прочностные показатели оценивались в возрасте 2, 14, 28 сут твердения (таблица 7).

Таблица 7 – Физико-механические свойства мелкозернистых бетонов для 3D-аддитивного производства

Состав	Пластификатор, масс.	Воздухововлекающая	Вязущее:П	Расход материалов кг/м ³				В/Ц	Осадка конуса, мм	R _{сж} , МПа в возрасте, сут			R _{ср} , кг/м ³	Морозостойкость
				КВ20	В	Песок	Вода			2	14	28		
<i>Кварцевый песок</i>														
1	–	–	1:1,5	792	1188	324	0,41	25	24,7	35,2	42,8	2254	F не менее	
1а	0,45	0,6							52	27,3	38,4	43,5		2140
2	–	–	1:3	500	1550	250	0,52	22	11,8	25,3	29,9	2250		
2а	0,6	0,6							46	12,2	29,8	34,2		2165
<i>Отсев КВП (0,315–1,25 мм)</i>														
3	–	–	1:1,5	777	1166	350	0,45	24	26,8	37,8	43,5	2223	F не менее	
3а	0,45	0,6							48	27,4	40,0	44,5		2190
4	–	–	1:3	500	1500	275	0,55	24	11,4	29,7	34,8	2245		
4а	0,8	0,6							49	14,5	30,6	35,5		2174

Как видно из полученных данных разработанные составы формовочных смесей достаточно быстро набирают начальную прочность, что обеспечивает возможность через 48 часов удалять изделия из поля печати.

Использование КВ на основе минеральной добавки ВКВП (20%) и мелкого заполнителя из отсева КВП позволяет получать прочные мелкозернистые бетоны класса В25-В30 в нормальных условиях твердения. Повышение прочностных свойств мелкозернистых бетонов обусловлено, во-первых, формирующейся уплотненной структурой цементной матрицы мелкозернистого бетона, заполнение пор в которой происходит не только растущими новообразованиями, но и частицами тонкодисперсного наполнителя, которые при этом играют роль активных центров кристаллизации (рисунок 4); во-вторых, повышенной адгезией формирующейся цементной матрицы к мелкому заполнителю из отсева КВП, на развитой поверхности зерен которого формируются тонкие пленки гидратных фаз, что приводит к усилению контактной зоны между заполнителем и цементным камнем.

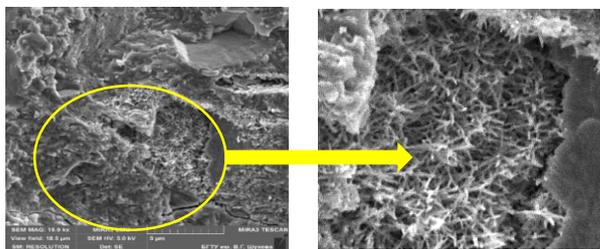


Рисунок 4 – Пора, заполненная продуктами гидратации, образованными на частице тонкодисперсного наполнителя

Таким образом, разработанные формовочные смеси подтверждают высокую эффективность использования КВ с микронаполнителем (20 %) из ВКВП и мелкого заполнителя из отсева КВП для 3D-аддитивного производства МАФ. При этом улучшается экологический компонент производства, так как снижается потребление портландцемента.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 25-19-00866) с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова. В ходе внедрения результатов теоретических и экспериментальных исследований, полученных при выполнении данной диссертационной работы, разработаны нормативно-технические документы. Опытно-промышленная апробация результатов диссертационной работы на предприятиях подтверждает достоверность полученных результатов. Техничко-экономическая эффективность полученных составов композиционных вяжущих и мелкозернистых бетонов обусловлена снижением расхода цемента за счет использования подготовленного геологическими процессами сырья.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования. Дополнены теоретические представления об энергосберегающих технологических процессах и методах создания мелкозернистых бетонов; управлении процессами структурообразования при использовании КВ с минеральной добавкой горных пород, подготовленных геологическими процессами, и мелкого заполнителя из отсева дробления КВП зеленосланцевой степени метаморфизма, позволяющие получать мелкозернистые бетоны с высокими эксплуатационными характеристиками.

Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение КВ с требуемыми эксплуатационными характеристиками для мелкозернистых бетонов, способствующее повышению прочностных показателей при снижении доли цемента. Использование минеральной добавки из подготовленного геологическими процессами ВКВП, предварительно молотого в вибромельнице с последующим смешением полученного порошка с цементом (ПЦ) в соотношении (по массе) ВКВП:ПЦ равном 1:4 приводит к повышению активности КВ с использованием ВКВП на 13% по сравнению с ПЦ. При увеличении удельной поверхности ВКВП до значений $S_{уд}=1000 \text{ м}^2/\text{кг}$ и соотношении (по массе) ВКВП:ПЦ равном 1:9 показатели активности КВ с использованием ВКВП повышаются на 19% по сравнению с ПЦ. Применение КВ с минеральной добавкой ВКВП позволит получить широкую номенклатуру мелкозернистых бетонов для МАФ: самоуплотняющийся бетон на белом цементе ПЦБ 1-500-ДО (9% ВКВП), самоуплотняющийся фибробетон на портландцементе ЦЕМ I 42,5 Н (9% ВКВП), бетон для 3D-аддитивного производства на портландцементе ЦЕМ I 42,5 Н (20% ВКВП).

Установлен характер влияния минеральных добавок ВКВП (9% и 20%) на свойства смеси и процессы структурообразования мелкозернистых бетонов. Установлена зависимость активности КВ с минеральной добавкой тонкомолотого ВКВП от удельной поверхности и расхода данной добавки. При $S_{уд}=500 \text{ м}^2/\text{кг}$ расход ВКВП составляет 20%; при $S_{уд}=1000 \text{ м}^2/\text{кг}$ расход ВКВП - 9%. Введение минеральной добавки ВКВП обеспечивает уплотнение микроструктуры цементной матрицы и макроструктуры композита при экономии цемента, что позволяет получить визуально привлекательные МАФ для улучшения качества архитектурно-градостроительной среды. Данные факты объясняются процессами дополнительного структурообразования за счет связывания выделяющейся при гидратации клинкерных минералов СаО аморфным кремнеземом, присутствующим в ВКВП, и синтеза гидросиликатов кальция второй генерации.

Предложена феноменологическая модель структурообразования мелкозернистых бетонов на основе КВ с минеральной добавкой ВКВП, обусловленная формирующейся уплотненной структурой и повышенной адгезией цементной матрицы мелкозернистого бетона с минеральной добавкой ВКВП, на развитой поверхности которой формируются тонкие пленки

гидратных фаз, взаимодействие с которыми приводит к упрочению контактной зоны между минеральной добавкой и цементным камнем.

Разработана технология получения КВ с показателями активности 62,1-69 МПа при замене 20% и 9% цемента на минеральную добавку ВКВП, полученную путем помола в вибромельнице.

Предложены составы смесей для получения самоуплотняющегося мелкозернистого бетона для МАФ при использовании КВ с минеральной добавкой ВКВП:

- мелкозернистый бетон на белом цементе ПЦБ 1-500-ДО с минеральной добавкой ВКВП (9%) и мела (7%) со следующими показателями: класс В30, марка по морозостойкости F150;

- мелкозернистый фибробетон на портландцементе ЦЕМ I 42,5 Н с минеральной добавкой ВКВП (9%) и стеклофибры (3%) со следующими показателями: класс В35, марка по морозостойкости F200.

Разработан состав смеси для получения мелкозернистого бетона для 3D-аддитивного производства на портландцементе ЦЕМ I 42,5 Н с минеральной добавкой ВКВП (20%) и мелкого заполнителя из отсева дробления КВП зеленосланцевой степени метаморфизма со следующими показателями: класс В30, марка по морозостойкости не менее F100.

На основании выполненных исследований показана возможность использования подготовленных геологическими процессами ВКВП в качестве сырья для производства строительных композитов.

По результатам научно-исследовательской работы подготовленные геологическими процессами ВКВП отнесены в разряд полезных ископаемых.

Теоретические и практические результаты могут быть **рекомендованы** к внедрению на предприятиях по производству МАФ; при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Строительство».

Перспективы дальнейших исследований целесообразно рассматривать в направлении изучения возможности совершенствования составов мелкозернистых бетонов с заменой части портландцемента на тонкомолотые минеральные добавки на основе ВКВП за счет управления процессами структурообразования, а также производства изделий различного назначения на их основе.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ

В отечественных журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ

1. *Столетова (Черепанова), И.А.* Композиционные вяжущие с использованием выветренных кварцитопесчаников курской магнитной аномалии / И.А. Столетова (Черепанова), В.С. Лесовик, Е.В. Фомина // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2025. – Т. 22, № 1(101). – С. 148–158. – DOI 10.26518/2071-7296-2025-22-1-148-15 (**K2**).

2. **Столетова (Черепанова), И.А.** Архитектурные бетоны для строительной 3D-печати / И.А. Столетова (Черепанова), А.А. Володченко // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2024. – Т. 21, № 6(100). – С. 1002–1016. – DOI 10.26518/2071-7296-2024-21-6-1002-1016 (**К2**).

3. Лесовик, В.С. Выветренные кварцитопесчаники Курской магнитной аномалии - сырье стройиндустрии / В.С. Лесовик, Е.В. Фомина, **И.А. Черепанова**, А.Н. Ряпухин // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2022. – Т. 19, № 5(87). – С. 728–737. – DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-5-728-737 (**К3**).

В изданиях, индексируемых в базе данных РИНЦ

4. **Столетова (Черепанова), И.А.** Мелкозернистые бетоны для малых архитектурных форм на основе техногенного сырья / И.А. Столетова (Черепанова) // Университетская наука. – 2024. – № 2(18). – С. 81-85.

5. Лашина, И.В. Применение отходов горнодобывающей промышленности как сырья для производства эффективных строительных композитов / И.В. Лашина, **И.А. Черепанова** // Приднепровский научный вестник. – 2017. – Т. 12, № -4. – С. 32-37.

6. Лашина, И.В. Пути решения экологических проблем горнодобывающей промышленности / И.В. Лашина, **И.А. Черепанова** // Приднепровский научный вестник. – 2017. – Т. 12, № -4. – С. 8-13.

7. Лашина И. В. К вопросу использования техногенного сырья различного генезиса для улучшения свойств акустических материалов / И.В. Лашина, А.А. Столетов, **И.А. Черепанова** // В сборнике: Фундаментальные основы строительного материаловедения. Сборник докладов Международного онлайн-конгресса – 2017 - С. 102-107.

8. Глаголев Е.С. Архитектурный бетон – комфорт городской среды / Е.С. Глаголев, **И.А. Черепанова**, А.А. Володченко, М.И. Ломов// В сборнике: Природоподобные технологии строительных композитов для защиты среды обитания человека. II Международный онлайн-конгресс, посвященный 30-летию кафедры Строительного материаловедения, изделий и конструкций. Белгород. - 2019. - С. - 62-65.

9. **Черепанова И.А.** Мелкозернистый бетон на основе техногенного сырья / И. А. Черепанова // Университетская наука - 2022. - № 1 (13). - С. 99-101.

В сборниках трудов конференций и других изданиях

10. Столетов А. А. Анализ проблемы рационального природопользования / А.А. Столетов, **И.А. Черепанова**, И. В. Лашина // Уральский научный вестник. – 2017. – Т. 12, № 4. – С. 83-88.

11. Дмитренко, А.Д. Использование современных материалов в архитектуре /А.Д. Дмитренко, **И.А. Столетова (Черепанова)** // В сборнике: Междисциплинарный дискурс. Диалог поколений. Сборник статей Международной научно-практической конференции. – Уфа. - 2024. - С.- 177-182.

14. Загороднюк Л.Х. Пути эффективного использования портландцементного клинкера / Л.Х. Загороднюк, Д.А. Сумской, С.В. Золотых, Д.С. Махортов, **И.А. Черепанова**, Д.Ю. Фалько, А.С. Чепенко // В сборнике: Теоретические основы создания эффективных композитов. Сборник материалов Российской онлайн-конференции, посвященной Дню науки. - 2018. - С. 263-269.

13. Володченко, А.А. Строительные композиты нового поколения с использования нетрадиционного сырья / А.А. Володченко, И.В. Лашина, **И.А. Черепанова** // В сборнике: Фундаментальные основы строительного материаловедения. Сборник докладов Международного онлайн-конгресса. - 2017. - С. 436-442.

СТОЛЕТОВА ИРИНА АЛЕКСАНДРОВНА

**МЕЛКОЗЕРНИСТЫЕ БЕТОНЫ
НА КОМПОЗИЦИОННОМ ВЯЖУЩЕМ С МИНЕРАЛЬНОЙ
ДОБАВКОЙ ВЫВЕТРЕННЫХ КВАРЦИТОПЕСЧАНИКОВ
ДЛЯ МАЛЫХ АРХИТЕКТУРНЫХ ФОРМ**

2.1.5. Строительные материалы и изделия
АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 17.10.2025. Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,2

Тираж 100 экз. Заказ 130

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом
университете им. В.Г. Шухова
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46