

АННОТАЦИЯ

Диссертационная работа Куттыбай М. Т. представлена для получения степени доктора философии PhD по образовательной программе 8D07340 - «производство строительных материалов, изделий и конструкций»

Тема диссертации – «Повышение эксплуатационных свойств литого модифицированного бетона на основе отходов ферросплавного производства»

Актуальность темы исследования. В строительной отрасли к литым модифицированным бетонам предъявляются высокие эксплуатационные требования, охватывающие широкий спектр эксплуатационных характеристик, среди которых особое внимание уделяется прочностным характеристикам, способности материала противостоять влаге, стойкости к повторному замораживанию и оттаиванию, способности сохранять целостность при взаимодействии с агрессивными веществами [1]. Многочисленные исследования продемонстрировали возможность усиления строительных конструкций путем использования полимерных добавок с высокой химической стойкостью [2]. Однако из-за высокой себестоимости производства полимербетоны не получили массового применения, в результате чего традиционные бетонные смеси по-прежнему остаются основным конструкционным материалом в строительстве. В европейских странах разработка и внедрение конструкций из монолитного модифицированного бетона достигли значительного уровня: имеются как обширные экспериментальные данные, так и успешно действующие технологии производства. На территории Республики Казахстан данное направление пока остается на стадии научных исследований и местных производственных испытаний, не получив широкого промышленного использования [3]. Исходя из этого, задача разработки литых модифицированных бетонов с повышенной стойкостью к агрессивным средам путем целенаправленного изменения их внутренней структуры представляется актуальной и практически значимой.

Для достижения этой цели ключевой задачей является создание литой модифицированной бетонной конструкции высокой плотности, обеспечивающей сбалансированное сочетание технологических показателей и эксплуатационной надежности. Это достигается за счет использования дисперсно-дифференцированных связующих компонентов, способствующих плотной упаковке частиц в каждом локальном микрообъеме материала, в сочетании с применением сложных многокомпонентных модификаторов [4-5].

Исследование проводилось в рамках Государственной программы индустриально-инновационного развития Республики Казахстан на 2020-2025 годы.

Степень разработанности темы. Анализ научных трудов отечественных и зарубежных исследователей, а также действующих

нормативно-технических документов выявил устойчивый интерес к проблемам повышения долговечности бетонных материалов, особенно в условиях агрессивного внешнего воздействия. Поэтому особое внимание уделяется стратегиям повышения устойчивости путем оптимизации состава и структуры цементных систем. Несмотря на значительный объем исследований в смежной области, тема формирования литых модифицированных бетонов с использованием полифракционных цементных систем, в которых осуществляется строго контролируемая гранулометрия, а также с использованием композиционного модификатора, состоящего из трех компонентов (включающий суперпластифицирующий агент, полимерную составляющую и микрокремнезем), остается научно недостаточно разработанной. Это особенно очевидно в контексте изучения того, как данная модификация влияет на закономерности структурной самоорганизации цементной матрицы, а также на конечные потребительские и физико-химические параметры затвердевшего композитного материала.

Научная гипотеза. Вероятнее всего, залогом формирования литого модифицированного бетона с высокой прочностью, устойчивостью к трещинам, морозу, влаге и агрессивным воздействиям является детальный контроль фракционного состава цементной составляющей в совокупности с воздействием трехкомпонентного модификатора. Предполагается, что такое инженерное соединение инициирует формирование пространственно-упорядоченной микроструктуры с выраженной кристалличностью и плотной упаковкой элементов, за счет чего достигается высокая структурная стабильность и длительная эксплуатационная надежность композита. Присутствие микрокремнезема в системе усиливает развитие вторичной пуццолановой реакции, в результате которой образуются химически стойкие гидросиликаты кальция низкого давления типа CSH(B). Это, в свою очередь, обеспечивает дальнейшее повышение коррозионной стойкости материала при работе в агрессивных условиях.

Цель и задачи исследования. Диссертация посвящена созданию научно обоснованного и технологически реализуемого подхода, позволяющего получать литой бетон с модифицированной структурой, способный эффективно функционировать в агрессивных условиях эксплуатации. Ключевым компонентом данного подхода является введение полифракционного связующего с контролируемым распределением зерен, в состав которого входит трехкомпонентный модификатор — комбинация гиперпластификатора, полимерной добавки и микрокремнезема. Предполагается, что такой комплекс должен обеспечить необходимые показатели производительности и эксплуатационной надежности готового материала.

Для выполнения этой задачи планируется поэтапно рассмотреть следующие направления исследований:

- определение наиболее оптимального состава цементного вяжущего, позволяющего добиться максимальной плотности основания на микроуровне;

- получение литой бетонной системы с целенаправленно модифицированной структурой, сочетающей полифракционную вязкую основу и трехкомпонентный модификатор, а затем оценка влияния такого состава на технологические показатели смеси;

- детальное исследование влияния сложного модификационного состава и совокупного эффекта вяжущего, распределенного по фракциям, на структурную эволюцию цементного камня и конечные физико-механические показатели уложенного бетона;

- разработка прикладного алгоритма адаптации полученного бетонного материала к условиям массового производства с последующим его целевым использованием при возведении элементов конструкций, работающих в агрессивных средах, включая обязательную техническую проверку его эффективности и анализ эксплуатационной надежности на инженерном уровне.

Объектом исследования является разновидность литого бетона с заданными модифицирующими характеристиками, характеризующийся полифракционной структурой и получаемый на основе цементного вяжущего с добавлением трех функциональных добавок – суперпластификатора, полимерного компонента и микрокремнезема. Основное назначение материала связано с его использованием в строительных проектах, осуществляемых в условиях интенсивной эксплуатации.

Предметом исследования является ряд параметров, определяющих как внутреннюю организацию структуры, так и эксплуатационные свойства модифицированного литого бетона. Полифракционная связующая система изучает влияние комбинации тонкодисперсных компонентов и модификаторов на свойства бетона, уделяя особое внимание прочности бетона, влаго-, морозостойкости и стойкости к агрессивным средам за счет высокой плотности оболочки.

Научная новизна. Разработан научно-обоснованный метод получения литого модифицированного бетона, основанный на использовании полифракционного цементного вяжущего с контролируемой гранулометрией, способствующей формированию плотной пространственно-упорядоченной структуры цементного камня.

Установлено влияние трехкомпонентного модификатора (суперпластификатор АП-122, поливинилпирролидон, микрокремнезем МК-95) на интенсификацию процессов гидратации и образование устойчивых гидросиликатов кальция типа CSH(B), обеспечивающих повышенные прочностные и эксплуатационные характеристики материала.

Впервые экспериментально подтверждено формирование равномерной микрокристаллической структуры цементного конгломерата с поровой системой диаметром 0,1–0,5 мкм, что обеспечивает снижение водопоглощения до 2,1% и повышение морозостойкости бетона до F600.

Предложен новый состав литого модифицированного бетона, обеспечивающий прочность при сжатии до 66,1 МПа и водонепроницаемость

до уровня W12, что подтверждает его эффективность для эксплуатации в агрессивных средах.

Разработан и внедрен нормативный технический документ (ТР «ЛМБ2022»), регламентирующий применение модифицированного литого бетона в промышленном строительстве.

Теоретическая и практическая значимость работы. На основании проведенных исследований получены новые сведения о механизме структурообразования бетонов, полученных с использованием полифракционных вяжущих и сложных тройных смесей (содержащих суперпластификаторы, водорастворимые полимеры и аморфный кремнезем) с контролируемым составом по гранулометрическому составу. Установлено, что создание микрокристаллической структуры в цементной матрице и максимизация плотности упаковки твердой фазы улучшают физико-механические свойства литого модифицированного бетона.

Разработанный в рамках данного исследования материал является результатом целенаправленной адаптации литого модифицированного бетона к условиям эксплуатации в высокоагрессивных средах. Представленная в работе композиция была создана не только как химико-технологическое решение, но и как инженерный ответ на вопросы устойчивого развития. Полученная смесь обладает рядом свойств, обеспечивающих ее пригодность для использования в сложных условиях: показатели прочности достигают 66,1 МПа при сжатии и 7,8 МПа при изгибе. Значение коэффициента интенсивности деформации, показывающего способность материала противостоять росту трещин, составляет 0,07467 МПа × М⁰. При этом водопоглощение снижается до минимума — не более 2,1%. Материал успешно проходит класс водонепроницаемости, достигая уровня W12, а морозостойкость подтверждена на уровне F600. Кроме того, стоит отметить его устойчивость к разрушительному воздействию химических веществ, что важно при использовании в инфраструктуре, подверженной коррозии.

В процессе практического применения предлагаемой технологии на производственном уровне разработан и вступил в силу нормативный документ - положение «Модифицированный литейный бетон на основе полифракционного вяжущего с добавлением композиционных модификаторов и техногенных компонентов, образующихся при производстве строительных ферросплавов». Указанный документ - ТР 250117-1412-21022004-2024 - утвержден под наименованием ТР «ЛМБ2022» и выступает в качестве основной технологической основы, обеспечивающей дальнейшее внедрение разработки в промышленную практику.

Методология и методы диссертационного исследования. Для проведения диссертационного исследования выбран подход, основанный на интеграции нескольких научных правил, отражающих принципы создания конкретных материалов с заданными эксплуатационными параметрами. Теоретической основой является концепция системного анализа в области материаловедения, позволяющая определить взаимосвязь между структурным строением, составом компонентов и физико-механическими

свойствами конечного продукта. Комплексность экспериментальных процедур обеспечивается применением проверенных инструментов научного анализа. К ним относятся методы рентгеновского фазового контроля, детальное сканирование микроструктуры, химические испытания, а также лазерная гранулометрия, используемые в сочетании с математической обработкой данных. Такой синтез позволил эффективно подобрать параметры мелкодисперсных частиц цементного компонента с учетом усадочной плотности частиц и их геометрических свойств, что в дальнейшем определило структурную устойчивость и прочность получаемой матрицы.

Положения, выносимые на защиту:

- Научная проверка возможности достижения высоких эксплуатационных показателей литого бетона основана на введении особой рецептуры цементного вяжущего с регулируемой структурой зерна и максимальной плотностью упаковки, а также использовании смеси поликарбоксилата, полимера и микрокремнезема как единой комплексной модификационной системы.

- Системные результаты, полученные в результате поэтапного изучения синергетического эффекта тройного модификатора, сосредоточены на его влиянии на стадии структурообразования, микроморфологии и конечных свойствах цементного камня и композита в целом.

- Эмпирическое установление зависимости критических прочностных характеристик, в том числе прочности на сжатие, изгиб, а также светостойкости, показателей циклического замораживания и химического разрушения, напрямую связана с изменением состава модифицирующей смеси в многокомпонентной системе на основе тонкодисперсного минерального вяжущего.

- Проведение аналитической оценки технико-экономической эффективности разработанных рецептур литейных материалов, а параметры внедрения в производство спроектированы с учетом затрат, ресурсоэффективности и рентабельности.

Степень достоверности результатов. Центральным элементом обоснования надежности результатов является набор факторов, минимизирующих влияние случайных и непостоянных искажений. Основным условием является использование высокоточных исследовательских и измерительных приборов, которые стабильно работают во многих испытаниях. Используемые методы контроля основаны на проверенных процедурах измерения, которые обеспечивают доверительный интервал не менее 0,96. Кроме того, для интерпретации полученных данных были использованы методы математического и статистического анализа, что позволило выявить закономерные зависимости и исключить статистически незначимые отклонения. Все это создает прочную основу для надежного подтверждения достоверности проведенных исследований в комплексе. Проверка работоспособности технических решений в ходе экспериментальных испытаний и проведение практических испытаний

бетонов, разработанных для эксплуатации в жестких условиях, дали хорошие результаты.

Апробация работы. Основное содержание и выводы диссертационного исследования были проверены на научном форуме: II Международная конференция «Промышленное строительство» (Алматы, 2025 г.). III Научно-практическая конференция «Особенности проектирования, строительства и эксплуатации зданий и сооружений с активной сейсмозащитой» (Алматы, Нао Руннит, 2024 г.) Международная научно-практическая конференция «Особенности проектирования, строительства и эксплуатации зданий и сооружений с активной сейсмозащитой» (Алматы, Нао Руннит, 2024 г.) Практическая конференция «Перспективы современного производства энергосберегающих строительных материалов» (Ташкент, 2023 г., Ташкент).

Внедрение результатов исследования. Промышленное внедрение разработанного литого модифицированного бетона осуществлено на предприятии «Темирбетон-1» при производстве железобетонных изделий: изготовлены 200 лотков серии Л9-11 и 100 лотков оросительных систем типа ЛР-6.

Личный вклад соискателя. Кандидат сформулировал цели и задачи своего диссертационного исследования, выбрал методы тестирования, а также проанализировал и интерпретировал полученные результаты. Для обеспечения плотной упаковки мелкой фракции клинкерных компонентов особое внимание уделялось исследованию зернового состава цементного вяжущего, что реализовывалось с помощью программно-вычислительных комплексов с использованием математических алгоритмов. Состав модифицированной бетонной смеси был оптимизирован с целью улучшения физико-технологических свойств. Рекомендации по применению бетона в суровых условиях. В научных изданиях выпускались публикации по темам исследований.

Публикации.Обобщенные правила диссертационного исследования нашли отражение в шести научных работах: три – в международных журналах, зарегистрированных в базе цитирования Scopus

1. Saduakasov M., Talal A., Kopzhasarov B., Akhmetov D., Nurumov R. (2025). Structural thermal insulating foam concrete properties for foundation insulation. International Journal of GEOMATE, Feb., 2025 Vol.28, Issue 126, pp.25-32 ISSN: 2186-2982 (P), 2186-2990 (O), Japan, DOI: <https://doi.org/10.21660/2025.126.4545> (SCOPUS Q3)
2. Abdraimov I., Talal A., Kopzhassarov B., Kuttybay M., Akhmetov D., Tynybekov R. (2024). Strength and durability effect of self-compacting concrete reinforcement with micro-silica and volume fiber. International Journal of GEOMATE, July, 2024 Vol.27, Issue 119, pp.26-33 ISSN: 2186-2982 (P), 2186-2990 (O), Japan, DOI: <https://doi.org/10.21660/2024.119.4334> (SCOPUS Q3)
3. Begentayev M., Kuldeyev E., Akhmetov D., Zhumadilova Zh., Suleyev D. (2025). The Effect of Mineral Fillers on the Rheological and Performance

Properties of Self-Compacting Concretes in the Production of Reinforced J. Compos. Sci. 2025, 9(5), 235; <https://doi.org/10.3390/jcs9050235>(SCOPUS Q1)

Две из них опубликованы в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень, утвержденный Комитетом по качеству науки и высшего образования Республики Казахстан

1. Kopzhassarov B., Akhmetov D., Zhagifarov A., Abdraimov I., Kuttybay M., Zhumadilova Z. (2024). Quality improvement effectiveness of road slabs produced using microsilica and fiber. QazBSQA Хабаршысы. Саулет және Құрылыс. №2 (92), Алматы 2024. Б.76-90 <https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.2-06> Received (КОКСНВО РК)
2. Kuldeyev E., Zhumadilova Zh. Zhagifarov A., Tolegenova A., Kuttybay M., Alikhan A. (2025). Physicochemical properties of silica fume and fly ash from Tau-Ken Temir LLP and Pavlodar CHP for potential use in self-compacting concrete. Technobius, 2025, 5(1), 0076, DOI: <https://doi.org/10.54355/tbus/5.1.2025.0076> (КОКСНВО РК)

А оставшиеся один патент получен на полезную модель

1. Кульдеев Е.И., Жұмаділова Ж.О., Ахметов Д.А., Құттыбай М.Т. (№ 10360). Состав для приготовления самоуплотняющегося бетона. [Патент].

Объем и структура диссертации. Объем диссертации составляет 183 страницу, включая структурные элементы, предусмотренные Академическим стандартом: оглавление, вводную часть, основной доклад в пяти тематических главах, заключительное заключение, библиографический список, содержащий 137 источников, и одно приложение. Иллюстративный материал представлен в виде 41 таблицы и 25 графических схем и рисунков.

Выводы по главе I

Одной из наиболее острых проблем в водном хозяйстве Казахстана остается изношенность инфраструктуры мелиоративных систем, в частности водохранилищ, работающих на пределе своих ресурсов и утративших за последние два с половиной десятилетия свои подъемные и гидравлические свойства. Анализ текущей ситуации показывает системную необходимость реконструкции каждого четвертого элемента. Эта реальность ставит острую инженерную и научную задачу — создать литой бетон с принципиально иными эксплуатационными свойствами, способный выдерживать агрессивные нагрузки, присущие гидротехническим сооружениям.

Основным направлением такого преобразования является проектирование микроструктуры бетона не как побочного эффекта твердения, а как управляемой системы с определенными параметрами. В его основе лежит полифракционное цементное вяжущее, содержащее строго подобранные фракции и трехкомпонентную модифицирующую композицию, которые синергически взаимодействуют с суперпластификатором, функциональным полимером и высокоактивным микрокремнеземом. Такой подход направлен не на улучшение отдельного свойства, а на полную

перестройку всей структуры — от текучести в новом состоянии до плотности и коррозионной стойкости в закаленном состоянии.

Ключевым моментом является не только снижение водоцементного отношения, но и резкое увеличение доли твердой фазы по мере приближения упаковки частиц к максимальному пределу плотности. Формирование многоуровневой архитектуры зерен с наличием остаточных крупных фракций позволяет создать внутри массива долговременный прочностной каркас, компенсирующий эксплуатационные напряжения и работающий с эффектом внутреннего самовосстановления.

В цементной матрице, армированной микрокремнеземом МК-95, наблюдается резкое сокращение капиллярного пространства, устранение слабых переходных зон и образование химически инертной, пространственно организованной оболочки, устойчивой к воздействию кислот, солей и теплопередачи. Речь идет не только о повышении эксплуатационных характеристик — речь идет о переходе на новый класс бетона, который адаптирован к суровым водным условиям и может сохранять структурную целостность в течение десятилетий без потери прочности или долговечности.

Выводы по главе II

Разработан литой модифицированный бетон с тройной системой добавок (гиперпластификатор, микрокремнезем, полимер, полипропиленовое волокно), обладающий высокими физико-механическими характеристиками: прочность на сжатие — 67,1 МПа, на изгиб — 7,28 МПа, водопоглощение — 2,1%, морозостойкость — F600, водонепроницаемость — W12. Использование отходов ферросплавного производства дополнительно повысило влагостойкость и долговечность материала.

Оптимизация гранулометрического состава цементного вяжущего (с размером фракции: 12 мкм — 15%, 6,6 мкм — 75%, 4,9 мкм — 10%) и точный подбор дозировок модифицирующих добавок (0,2% повидон-К30, 0,7% полипропиленовое волокно) обеспечили повышение прочности при снижении себестоимости.

Выводы по главе III

На основе методологии рецептуры добавок для бетона, предложенной профессором Накамурой, была разработана первоначальная версия формулы модифицированного монолитного бетона. В ходе лабораторных испытаний проведена экспериментальная корректировка параметров смеси для бетона марки М30, соответствующего классу прочности В450. В результате были также зафиксированы значения реологических свойств скорректированного состава.

В процессе предварительного анализа осуществлено моделирование распределения полифракционных систем, включающих три фракции различной степени дисперсности: F1 – средний диаметр частиц $d_{cp} = 12$ мкм, удельная поверхность $S_{cp} = 1500$ см²/г; F2 – $d_{cp} = 6,6$ мкм, $S_{cp} = 3000$ см²/г; F3 – $d_{cp} = 4,9$ мкм, $S_{cp} = 4500$ см²/г. Полученные результаты показали, что плотность упаковки частиц варьируется от 0,555398 до 0,620393. Минимальное значение упаковки зафиксировано для состава

100/0/0, максимальное – для состава 60/20/20. Оптимальным по совокупности технологических и физико-механических показателей признан состав №6, включающий 15 % фракции 1500 см²/г, 75 % фракции 3000 см²/г и 10 % фракции 4500 см²/г, при этом наблюдается устойчивая положительная корреляция между плотностью упаковки и прочностью бетона.

Уравнения регрессии второго порядка (3.10, 3.11, 3.12) достоверно показывают связь изменения прочности при сжатии, условного коэффициента интенсивности деформаций и водопоглощения литого модифицированного бетона с варьируемыми параметрами: массовым содержанием полимера повидона-К30 (хакт) и объемной концентрацией полипропиленового волокна (х₂).

При помощи математического инструментария Matlab R2022a определены экстремальные значения целевых функций регрессионных уравнений. Установлено:

МАХ Y₁ = 77,5 при x₁ = 0,0235 и x₂ = 0,0928 (в пересчёте – 0,202 % и 0,714 % соответственно);

МАХ Y₂ = 0,075 при x₁ = 0,2667 и x₂ = 0,2355 (в пересчёте – 0,227 % и 0,734 % соответственно);

MIN Y₃ = 2,352 при x₁ = 0,390 и x₂ = 0,130 (в пересчёте – 0,238 % и 0,718 % соответственно).

Численным анализом определяются оптимальные значения переменных факторов: x_{1_opt} = 0,2 и x_{2_opt} = 0,7 в естественных координатах. Эти параметры позволяют одновременно достичь максимальной прочности на сжатие (R_{сж}) и снизить водопоглощение. Подставляя найденные значения, уравнения регрессии дали следующие свойства материала: r_{sh} = 77,4 МПа, коэффициент условного напряжения деформации K_{с *} = 0,074 МПа х М^{0.5}, водопоглощение W_m = 1,9 %.

Выводы по главе IV

Анализ фазового состава, представленный в таблице 4.2, показал, что в отличие от использования стандартного цемента (состав 1-Сем I 42,5 ч) при переходе на полирефрактивный адгезив (состав 2) наблюдается увеличение доли клинческих соединений. Это снижение напрямую связано с наличием в нем крупных, частично инертных фракций (1500 см²/г), которые выполняют роль резерва клинкерного материала. При замене полифракционного связующего на гиперпластификаторы AP122 (компонент 3) или Повидон-К30 (компонент 4) зафиксирована незначительная потеря метчиков и содержания с-с, не превышающая 1-2% относительно основного состава.2. При одновременном добавлении обоих компонентов (состав 5) наблюдалось аналогичное снижение доли клинкерных фаз, однако уровень гидратации увеличивался до 57%, что свидетельствует об усилении процессов гидратации. 15% микрокремнезема МК-95 -. (состав 6) при дальнейшем введении пуццолановая реакция активизировалась: количество портландита Са(ОН)₂ уменьшилось более чем на 2% по сравнению с 26, а в структуре стали преобладать устойчивые низкоосновные гидросиликаты кальция. Перспективность концепции использования клинкерного сырья

подтверждена результатами длительных испытаний: через 6 месяцев в 7-й партии содержание клинкера и сульфатов снизилось на 10% и 11% соответственно, количество Са(он) снизилось до 10,4%, а степень гидратации возросла до 82%. Таким образом, введение крупнозернистой фракции ($S_{уд} = 1500 \text{ см}^2/\text{г}$) обеспечивает длительное развитие структуры цементного камня и способствует формированию высокопрочного бетона.

Электронная микроскопия цементного камня выявила радикальные изменения в его структуре. Влияние гиперпластификатора, полимеров и микрокремнезема привело к образованию прочной и однородной пористой матрицы, в которой особенно заметно скопление игольчатых кристаллов этtringита. Размер этих кристаллов значительно уменьшился, достигнув 60-70 нм. Структура цементного камня в настоящее время характеризуется массивной мелкопористой сеткой с размерами пор от 0,1 до 0,5 мкм, что в свою очередь свидетельствует о развитии высокой плотности материала и потенциальной устойчивости к агрессивным внешним воздействиям.

Сравнительные испытания контрольной цементной системы и модифицированной рецептуры № 6 выявили явные реологические преимущества. Уменьшение времени завершения на 7 секунд наблюдалось при введении полирефрактивного клея, содержащего пакет добавок (ar122 – 1,7%, повидон-K30 – 0,2%, МК-95 – 15%) и полипропиленовое волокно (0,7%). когда индекс складывания уменьшается на 10%. Можно отметить, что наблюдаемые изменения параметров напрямую влияют на эксплуатационные характеристики композита: благодаря модифицирующим добавкам удастся снизить фракционное расслоение, подавить процессы крупнозернистого заполнения, выровнять морфологию бетонного массива в вертикальных сечениях.

Установлено, что механические параметры цементных систем при сжатии и изгибе четко связаны с использованием модифицирующих компонентов. Аналитический обзор позволяет составить отчет:

- Состав 5 (ПВ + ar122 1,7% + повидон-K30 0,2% + МК-95 15%) превысил контрольный образец 1 (ПК + ar122 1,7%) на 14,4 МПа (+29%), а вариант 2 (ПВ + ar122 1,7%) на 8,4 МПа (+15%), что подтверждает синергетический эффект комплексной модификации;

- Добавление 60,7% полипропиленовых армирующих волокон обеспечило увеличение прочности на сжатие с 4,7% до 5%, однако экспериментальные данные показывают, что превышение критического предела концентрации волокон приводит к тенденции к слипанию структурных элементов с последующим снижением механических свойств;

- Результаты испытаний выявили лидером по прочности на изгиб состав 6 (+модификатор ir) – пороговые значения r_{tb} превысили контроль на 1,78 МПа (+32,4%), а образец 5 – на 0,67 МПа (+10,1%), что косвенно указывает на роль волокон в перераспределении напряжений при деформации.

Кардинально переосмыслены закономерности разрушения и параметры образования трещин в призмах из ЛКМ. Ключевое наблюдение: образцы,

армированные волокном (версия 6), демонстрируют нелинейный сценарий разрушения — начальная зона трещины постепенно расширяется с увеличением напряжения на 35,2% во время изгиба по сравнению с контролем. В модифицированных системах показатель концентрации напряжений увеличился на 40,91%, что может быть связано с рассеиванием энергии через их мостики. Интересно, что кинетика растрескивания в полипропиленовых композициях имела квазипластические свойства: вместо катастрофического распада наблюдалось многостадийное «набухание» дефектов. Это явление косвенно подтверждает гипотезу о гашении микродеформаций — армирующие элементы способны поглощать часть разрушающих нагрузок, переводя хрупкое сколы в контролируемый процесс деградации. Стоит отметить парадокс: несмотря на улучшение светостойкости, избыток волокон (более 0,7%) вызывает эффект обратной связи — накопление волокон создает новые концентрации напряжений.

Проведёнными испытаниями подтверждено улучшение гидрофизических характеристик модифицированных составов. В частности, состав 6 (ПВ + 1,7% AR122 + 0,2% Повидон-K30 + 15% МК-95 + 0,7% ПФ) продемонстрировал снижение водопоглощения на 52,3% по сравнению с контрольным образцом (состав 1). Аналогичные показатели для других исследуемых составов составили: 34,1% (состав 2), 40,9% (состав 3), 45,5% (состав 4), 50% (состав 5).

Криоустойчивость бетонных систем выявила необычные закономерности при испытании модифицированных образцов. Составы 5-6 с полифункциональными добавками показали рекордную вязкость разрушения: после повышения температуры на 600°C потеря массы не превысила 1,7-1,8%, а регресс прочности сохранился на уровне 9,3-10,1%. Наблюдаемое явление позволяет выдвинуть тезис о синергетическом эффекте: сочетание химических пластификаторов и армирования волокнами способно препятствовать капиллярной миграции влаги за счет изменения структуры порового пространства. Интересно отметить парадокс — несмотря на однородность показателей, состав 6 с волокнами показывает несколько меньшую деградацию прочности (9,3% против 10,1%), что можно объяснить тем, что микрофракция действует как сетка распределения напряжений в областях ледяных линз.

Экспериментальные испытания коррозионной стойкости систем ЛМБ выявили аномальную стойкость модифицированных образцов. Можно сказать, что состав 6 (ПВ + [ar122 1,7% + повидон-K30 0,2% + Мк-95 15%] + ПФ 0,7%) проявляет максимальную инертность по отношению к химической агрессии:

Скорость распада массы в хлоридной среде (3% NaCl) снизилась на 29,3%, а регрессия прочности на сжатие/изгиб составила 38,8% и 30% соответственно по сравнению с контрольной группой;

Кислотное воздействие (0,01 м HCl) привело к снижению показателей - масса уменьшилась на 27,7%, прочность на сжатие на 27,4%, прочность на изгиб на 23,7%;

Испытания очищенной воды, имитирующей вымывание, выявили аномальные тенденции: потеря массы при катастрофическом снижении мощности снизилась на 18,6% до 50,4% (сжатие) и на 49,6% (изгиб) по сравнению с контрольным фоном;

Воздействие сульфата (5% Navsoox) вызвало противоположные изменения – динамика роста массы замедлилась на 24,3%, прочность на сжатие увеличилась на 20%, прочность на изгиб увеличилась на 18,3% и показала обратную зависимость. Парадоксальный эффект может быть обусловлен образованием защитных фаз в матрице вследствие воздействия сульфата.

Выводы по главе V

Табличные данные выявили принципиальное превосходство инновационной бетонной матрицы над референтными системами. Каскадная модификация на основе полифракционного связующего, сочетающего остатки ферросплавов, полимерную матрицу (ar122 — 1,7%, повидон-K30 — 0,2%) и 0,7% полипропиленового волокна, позволила перезагрузить профиль эксплуатационных характеристик материала. Синергию компонентов можно назвать катализатором повышения качества: микросилика (15%) образует плотную матрицу, волокна препятствуют образованию трещин, а полимерный комплекс ингибирует деструктивные процессы.

Использование промышленных отходов не только снизило, но и повысило барьерные свойства — эффект, который может быть обусловлен образованием наноразмерных интерметаллических слоев в цементной матрице.

В производственном году на нужды отопления и горячего водоснабжения планируется потребить 67 060 Гкал тепловой энергии, расчет стоимости этих ресурсов зафиксирован в табл.5.3. Что касается потребления холодной воды, то ее объем определяется с учетом нормативов на технологические операции и санитарно-технические нужды в соответствии с требованиями «СНиП 2.04.01-85*» СП 30.13330.2016, регламентирующего проектирование внутренних систем водоснабжения и канализации зданий.

В результате расчетов определено, что переход на технологию с использованием полифракционного вяжущего в сочетании с комплексной смесью, содержащей гиперпластификатор AP122, полимер повидон-K30 и микросиликат МК-95, позволит сэкономить 2462 тенге на кубометре уложенного модифицированного бетона, исходя из уровня цен 2024 года.

Техническая эффективность разработанного состава литого модифицированного бетона, включающего полифракционное вяжущее, отход ферросплавного производства и полипропиленовое волокно, была оценена по совокупности физико-технических показателей. Сравнительный анализ результатов производственных испытаний композиции ПВ+(1,7% AR122+0,2%повидон-K30+15%МК-95)+ПФ на 0,7% по сравнению с контрольным заводским вариантом выявил следующие закономерности: увеличение прочности при сжатии на 40,7%; на 32,2% увеличивается прочность на растяжение при изгибе; Коэффициент условной прочности на

разрыв скачка снизился на 38,5%, а водопоглощение материала уменьшилось на 54%; уровень водонепроницаемости увеличился на три уровня давления; Показатель морозостойкости увеличился вдвое.

Итоги проведённого исследования:

Разработан литой модифицированный бетон с тройной системой добавок (гиперпластификатор, микрокремнезем, полимер, полипропиленовое волокно), обладающий высокими физико-механическими характеристиками: прочность на сжатие — 67,1 МПа, на изгиб — 7,28 МПа, водопоглощение — 2,1%, морозостойкость — F600, водонепроницаемость — W12. Использование отходов ферросплавного производства дополнительно повысило влагостойкость и долговечность материала.

Оптимизация гранулометрического состава цементного вяжущего (с размером фракции: 12 мкм — 15%, 6,6 мкм — 75%, 4,9 мкм — 10%) и точный подбор дозировок модифицирующих добавок (0,2% повидон-К30, 0,7% полипропиленовое волокно) обеспечили повышение прочности при снижении себестоимости.

Рентгенофазовый анализ показал снижение содержания портландита на 26% и активное развитие пуццолановой реакции. Через 6 месяцев степень гидратации достигла 82%, что подтверждает наличие клинкерного резерва и потенциал материала к долговременной прочности.

Электронно-микроскопический анализ выявил плотную микроструктуру цементного конгломерата с равномерно распределённой мелкопористостью (0,1–0,5 мкм) и стабилизированной фазой этtringита (60–70 нм), что способствует снижению трещинообразования.

Механические испытания подтвердили улучшение прочности при сжатии и изгибе по сравнению с контрольными составами: рост на 29% и 32,4% соответственно. Добавление полипропиленового волокна обеспечило дополнительный прирост прочности и повышение деформативной устойчивости.

Композит показал высокую стойкость к химической деградации (NaCl, HCl, вода, Na₂SO₄), с незначительными потерями массы и прочности. Производственная апробация на ТОО «Темирбетон-1» доказала применимость технологии в реальных условиях. Экономический эффект составил 2572 тенге на м³ продукции.

Перспективы: использование расширенного спектра вторичных минеральных компонентов для повышения прочности, экологичности и экономичности литого бетона.