

АННОТАЦИЯ

диссертационной работы

на тему: «Разработка составов мелкозернистого бетона с использованием золошлаковых отходов Усть-Каменогорского ТЭЦ для аддитивных технологий» представленной на соискание степени доктора философии (PhD) по образовательной программе 8D07302 – «Производство строительных материалов, изделий и конструкций»

Актуальность темы исследования обусловлена приоритетными направлениями развития науки Республики Казахстан на 2024–2026 годы: «Экология, окружающая среда и рациональное природопользование» и «Энергия, передовые материалы и производство». Особое значение имеет утилизация золошлаковых отходов теплоэлектростанций и разработка новых строительных материалов на их основе. Одновременно развитие аддитивных технологий в строительстве требует создания специальных бетонных смесей с заданными свойствами. В связи с этим разработка составов мелкозернистого бетона с использованием золошлаковых отходов для 3D-печати является актуальной научно-практической задачей.

Целью диссертационной работы заключается в комплексном исследовании золошлаковых отходов Усть-Каменогорской ТЭЦ, применяемых в технологических свойствах мелкозернистого бетона для аддитивных технологий (3D-печати), с научным обоснованием их оптимального состава и параметров применения.

Для достижения цели ставились следующие задачи:

- провести анализ применения аддитивных технологий в строительстве, использования золошлаковых отходов ТЭЦ для производства мелкозернистого бетона, в том числе для аддитивных технологий, и методов разработки его составов
- изучить особенности формирования и распределения золошлаковых материалов в золоотвале Усть-Каменогорской ТЭЦ и оценить возможность их использования в цементных композициях.
- разработать и обосновать составы мелкозернистого бетона с использованием золошлаковых отходов Усть-Каменогорской ТЭЦ, пригодные для применения в аддитивных строительных технологиях (3D-печати).
- исследовать реологические, технологические и физико-механические свойства разработанных бетонных смесей и бетонов.
- провести экспериментальные испытания разработанных составов в условиях аддитивного формования (3D-печати) и оценить качество получаемых бетонных элементов.
- оценить эксплуатационные свойства разработанных бетонов, выполнить моделирование их работы и определить технико-экономическую эффективность применения.

Методы исследования. В работе использованы теоретические (анализ и обобщение отечественного и зарубежного опыта, моделирование свойств бетонов), экспериментальные (исследование физико-механических и

реологических характеристик сырья и бетонов, подбор составов, испытание образцов), инструментальные (рентгенофазовый анализ, электронная микроскопия) и опытно-производственные методы (экспериментальная 3D-печать образцов, технико-экономическая оценка эффективности).

Научная новизна исследования:

- научно обосновано, что наиболее эффективным активным компонентом является зола 4-й зоны, характеризующаяся минимальной насыпной плотностью (350–500 кг/м³) и максимальным содержанием стеклофазы (75–93%). Исследованиями подтверждено, что преобладание аморфных алюмосиликатов в этой зоне обеспечивает высокую реакционную способность при условии механической активации, необходимой для разрушения инертных агрегатов и увеличения удельной поверхности до 3000–4000 см²/г;

- сферические частицы золы фракции 0,16 мм снижают внутреннее трение смеси, обеспечивая стабильную экструзию при ПГР 7,0–7,5 см, а также уплотняют структуру бетона за счёт заполнения межзерновых пустот;

- экспериментально обосновано, что оптимальные характеристики бетона достигаются при использовании механически активированного вяжущего, полученного путем совместного помола 80% портландцемента и 20% золы (преимущественно из 4-й зоны золоотвала). Данный метод подготовки компонентов обеспечивает достижение предела прочности при сжатии 22,9 МПа и прочности межслойного сцепления 14,8 кгс/см²;

- статистико-регрессионное моделирование свойств бетона: Разработана математическая модель, базирующаяся на методах машинного обучения (реализована в среде *Python* с использованием библиотек *pandas* и *NumPy*), которая описывает зависимость прочности бетона от содержания механически активированного вяжущего. Высокие значения коэффициента детерминации ($R^2=0,87–0,95$) математически подтверждают, что прочностные характеристики на 87–95% определяются именно составом активированной золоцементной связки;

- на основе инструментальных исследований (XRD, SEM) доказано формирование высокоплотной цементно-золевой матрицы за счет пуццолановой реакции, где аморфный кремнезем золы взаимодействует с портландитом, образуя вторичные гидросиликаты кальция (C–S–H). Численным моделированием в ANSYS подтверждено, что в оптимизированном составе (80/20) возникающие при печати малых архитектурных форм эквивалентные напряжения (2,51 МПа).

Научные положения, выносимые на защиту:

- обоснование возможности использования золошлаковых отходов Усть-Каменогорской ТЭЦ в составе мелкозернистого бетона, предназначенного для аддитивных технологий;

- закономерности влияния состава и минералогических характеристик золошлаковых компонентов на реологические свойства, формоустойчивость и адгезию слоёв при 3D-печати;

- разработанные составы мелкозернистого бетона с использованием золошлаковых отходов, обеспечивающие оптимальное сочетание прочностных и технологических характеристик для аддитивного строительства;

- результаты экспериментальных и инструментальных исследований (XRD, SEM), подтверждающие эффективность использования золошлаков для формирования структуры и долговечности бетона.

Практическая значимость работы:

- разработан и рекомендован к применению научно обоснованный состав мелкозернистого бетона с использованием золошлаковых отходов Усть-Каменогорской ТЭЦ для аддитивных технологий;

- получен патент Республики Казахстан на полезную модель № 10443 «Состав бетонной смеси для 3D-печатного бетона»;

- получен патент Республики Казахстан на полезную модель № 12067 «Сырьевая смесь для 3D-печати бетонных изделий на основе золошлаковых отходов»;

- получено свидетельство о государственной регистрации прав на объект авторского права № 68369 от 5 марта 2026 года на методику подбора состава бетонной смеси для 3D-печати с учетом подвижности напечатанного слоя и устойчивости формы;

- разработанный состав мелкозернистого бетона внедрен при изготовлении элементов благоустройства территории университета методом строительной 3D-печати, что подтверждается актом внедрения;

- результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс образовательных программ 6В07305 – «Строительство» и 6В07501 – «Стандартизация и сертификация», что подтверждается актом внедрения в учебный процесс.

Личный вклад автора заключается в активном участии в формулировании цели исследования и постановке задач, а также в подготовке научных публикаций, тезисов докладов и подаче заявки на патент. Лабораторные исследования и испытания выполнены автором самостоятельно. В совместных публикациях автор внёс значительный вклад в проведение экспериментальных исследований, обработку и анализ полученных данных, подготовку текстов статей, а также разработку рекомендаций по внедрению результатов в процессы благоустройства территории университета и в учебный процесс.

Степень достоверности результатов исследования. Достоверность полученных научных результатов подтверждается применением современных методов исследования и соблюдением требований действующих нормативно-технических документов. Экспериментальные исследования проводились в аккредитованной лаборатории строительных технологий и материалов на базе «Центра компетенции и трансферта технологий в области строительства» (НАО ВКТУ). Дополнительные исследования выполнены на базе Политехнического университета Мадрида (Испания) в период научной

стажировки. Полученные результаты подтверждены комплексом лабораторных и опытно-экспериментальных исследований.

Апробация работы. Основные результаты диссертации опубликованы в следующих журналах/конференциях:

- «Optimization of a sustainable composition of fine-grained concrete for 3D-printing with partial substitution of sand with fly ash and slag waste», *Nanotechnologies Constr. Sci. Internet-J.*, с. 296, июн. 2025, doi: 10.15828/2075-8545-2025-17-3-296-306;

- «Additive Manufacturing as an Alternative to Core Sampling in Concrete Strength Assessment», *Appl. Sci.*, т. 15, вып. 14, с. 7737, июл. 2025, doi: 10.3390/app15147737;

- «Fine-grained concrete based on waste from thermal power plants and metallurgical enterprises East Kazakhstan region», *Bull. Serikbayev EKTU*, вып. 1, сс. 313–323, дек. 2023, doi: 10.51885/1561-4212_2023_4_313;

- «Development of composition of fine-grained concrete based on ash-and-slag wastes for additive technology of manufacturing small architectural forms», *Technobius*, т. 4, вып. 4, с. 0069, ноя. 2024, doi: 10.54355/tbus/4.4.2024.0069;

- Международная научно-практическая конференция «XVII Сагиновские чтения. Интеграция образования, науки и производства», часть 3, с. 260–261, доклад на тему «Разработка бетонных смесей для 3D-печати»;

- Международная научно-практическая конференция «XVI Сагиновские чтения. Интеграция образования, науки и производства» (13–14 июня 2024 г.), с. 261–262, доклад на тему «3D (аддитивті) принтерлерде қолданылатын ұсақ түйіршікті бетон үшін жергілікті шикізат материалдарын пайдалану мүмкіндігі».

- патент Республики Казахстан на полезную модель №10443, от 13.02.2025. «Состав бетонной смеси для создания 3D-печатного бетона»

- патент Республики Казахстан на полезную модель №12067, от 17.04.2026г «Сырьевая смесь для 3D-печати бетонных изделий на основе золошлаковых отходов»

- свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом №68369 от 5 марта 2026 г. «Методика (алгоритм) подбора состава бетонной смеси для 3D-печати с учетом подвижности и формоустойчивости напечатанного слоя».