

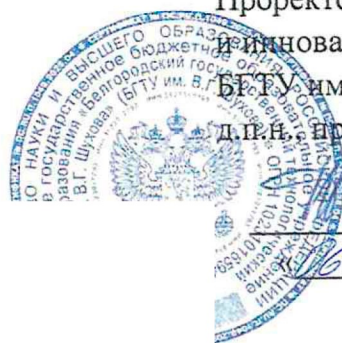
УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной деятельности

и инновационной деятельности

БГТУ им. В.Г. Шухова,

д.п.н., профессор



Давыденко Т.М.

02

2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Белгородский государственный
технологический университет им. В. Г. Шухова»

на диссертационную работу **Мин Хейн Хтета**, на тему:

«Получение сульфоалюминатного цемента и исследование его свойств»,
представленную на соискание ученой степени **кандидата технических наук**
по специальности 2.6.14. Технология силикатных и тугоплавких
неметаллических материалов

1. Актуальность темы исследования

Настоящее исследование направлено на повышение экологичности строительных материалов в условиях глобального перехода к устойчивому развитию. Современные мировые тенденции предполагают снижение воздействия на окружающую среду и рациональное использование природных ресурсов. Для повышения долговечности и физико-механических свойств цементов и бетонов, а также снижения выбросов CO_2 необходимо создавать новые виды вяжущих и совершенствовать существующие технологии. В этом контексте особый интерес представляют сульфоалюминатные цементы (САЦ), обладающие высокой экологической и технологической эффективностью. Сульфоалюминатный цемент привлекает внимание благодаря возможности синтеза клинкера при сравнительно низких температурах, а также высоким эксплуатационным характеристикам, включая быстрый набор прочности, долговечность и устойчивость к агрессивным средам. Однако его промышленное производство ограничено экономическими и ресурсными факторами, поскольку для получения САЦ с содержанием $\text{C}_4\text{A}_3\text{S} \geq 40\%$ требуется дорогостоящее и дефицитное сырьё – бокситы, каолины и технический глинозём.

Научно-практическая актуальность работы определяется разработкой технологии производства клинкера сульфоалюминатного цемента с использованием техногенного сырья – отходов химической и металлургической промышленности,

химический состав которых подходит для синтеза данного вяжущего. Совершенствование композиции сульфоалюминатного цемента с минеральными модификаторами позволяет улучшать эксплуатационные свойства сухих строительных смесей и бетонов, расширять производство вяжущего и снижать негативное воздействие на окружающую среду.

2. Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы составляет 195 страницы машинописного текста, включая 34 таблицы, 82 рисунка и 2 приложения. Список литературы содержит 230 источников отечественных и зарубежных авторов.

Во введении рассмотрена и обоснована актуальность проведенной работы, поставлены цели и задачи исследования, представлены научная новизна и теоретическая и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации и публикациях автора.

В первой главе представлен аналитический обзор состояния науки и практики в области улучшения технических свойства цемента. Приведены сведения о сульфоалюминатном цементе, рассмотрены сырьевые компоненты для получения сульфоалюминатного клинкера, основные особенности технологического процесса и параметров синтеза. Показано влияние различных добавок и модификаторов на структуру цементного камня и его основные физико-механические свойства. Установлено различное воздействие добавок на фазовый состав цементного камня, что обосновывает перспективность дальнейших исследований по получению сульфоалюминатного клинкера на основе различных сырьевых материалов и изучению цементов с разнообразными минеральными добавками.

Во второй главе описаны материалы и методы исследования. Приведены характеристики исходных материалов, определения свойств сульфоалюминатного цемента, а также используемые физико-химические методы анализа (рентгенофазовый, электронная микроскопия и др.) и физико-механические испытания.

Третья глава посвящена получению сульфоалюминатного клинкера с использованием природного сырья и техногенных отходов и исследованию его свойств. Показано, что использование шлаков вторичной переплавки алюминия позволяет частично заменять бокситы без снижения качества клинкера, который образуется при температуре 1250-1300 °С в течение 60 мин. При этом содержание основной фазы – сульфоалюмината кальция зависит от состава применяемой сырьевой смеси. Установлено, что лимитирующей стадией процесса минералообразования является диффузия, а кинетика процесса описывается уравнениями Яндера и Ерофеева–Колмогорова. Энергия активация процесса минералообразования для клинкеров, полученных с алюминиевыми шлаками, составляет 41-59 кДж/моль, в то

время как для клинкеров, синтезированных с бокситами, в несколько раз выше – 206–512 кДж/моль. Водопотребность синтезированного сульфоалюминатного цемента практически не зависит от его состава. Но сроки схватывания и прочность определяются типом формирующейся алюминатной фазы. Максимальной прочностью в возрасте 28 сут (при изгибе 15-17 МПа, при сжатии 62-69 МПа) достигают составы с алюминатными шлаками, в которых устойчиво образуется большое количество сульфоалюмината кальция. Полученные в работе результаты подтверждают целесообразность использования промышленных отходов при производстве сульфоалюминатного клинкера, что позволяет снизить экологическую нагрузку и экономить ресурсы. На основе разработанных составов на АО «Подольск Цемент» выпущена опытно-промышленная партия клинкера и цемента, соответствующая всем требованиям.

В четвертой главе приведены результаты исследования влияния примесных элементов на структуру и свойства сульфоалюминатного клинкера. Для исследования были приготовлены 5 модельных смесей с различным соотношением CaO , $\text{Al}(\text{OH})_3$ и $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Обжиг модельных систем показал, что устойчивая фаза сульфоалюмината кальция формируется при содержании $\text{Al}(\text{OH})_3$ более 50 мас. %. Далее в данную модельную смесь вводили микродобавки KNO_3 , NaCl , CaHPO_4 , KCl и NaNO_3 в количестве 0,5-5 % от массы исходной смеси. Модельные смеси обжигали при температурах 1300-1350 °С с изотермической выдержкой 60 мин. Введение микродобавок в исходную шихту приводит к изменению скорости процессов минералообразования и может оказывать влияние на фазовый состав конечного продукта. Установлены содержание микродобавок и режимы обжига, при которых в клинкерах образуется максимальное количества сульфоалюмината кальция. Изучены физико-механические свойства цементов на основе сульфоалюминатных клинкеров с примесными добавками.

В пятой главе представлены результаты исследования по влиянию вида и количества минеральных добавок (золы-уноса, известняка, доменного гранулированного шлака и метаксаолина) на свойства сульфоалюминатных цементов. Показано, что введение до 20 мас. % золы-уноса, известняка и шлака или до 10 мас. % метаксаолина повышают прочность цементного камня, по сравнению с бездобавочным цементом. Определены оптимальные составы композиции сульфоалюминатный цемент + минеральная добавка, обеспечивающие максимальную прочность, упорядоченную структуру и низкую пористость – это введение 10 мас. % золы-уноса, 5 мас. % известняка, 20 мас. % доменного гранулированного шлака и до 5 мас. % метаксаолина), Показана роль различных минеральных добавок в формировании структуры цементного камня.

В шестой главе представлены результаты по разработке составов ремонтного гидроизоляционного вяжущего на основе созданных композиционных вяжущих с

использованием сульфоалюминатного цемента. Показано, что оптимальный состав вяжущего, содержащий 10 % сульфоалюминатного и 90 % портландского цемента, обеспечивает прочность через 28 сут 8,5 МПа при изгибе и 56,9 МПа при сжатии. Введение пластификаторов снижает водопотребность, уменьшает пористость и повышает прочность растворов – прочность на 1 сут составляет 5,1–8,3 МПа при изгибе и 31,8–60,1 МПа при сжатии, а к 28 сут повышается до 11,2–17,5 МПа и 82–100 МПа, соответственно при изгибе и сжатии в зависимости от соотношения вяжущее / песок. Линейная относительная деформация расширения составляет 0,2 мм/м, водопоглощение – 1,5–2,0 %, капиллярное водопоглощение – 0,10–0,15 кг/м²·ч^{0,5}, что подтверждает перспективность предложенных составов для применения в ремонтных гидроизоляционных растворах. Приведены результаты опытной проверки свойств разработанных составов ремонтной гидроизоляционной смеси в производственных условиях.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам исследования, обобщены научные и практические результаты, дана оценка перспектив применения разработанных композиций.

Автореферат соответствует тексту диссертации, а публикации автора полно и всесторонне отражают содержание рецензируемой работы.

3. Степень обоснованности и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы подтверждаются использованием современных методов исследования и сопоставлением полученных результатов с литературными данными. В работе применялись физико-химические и физико-механические методы анализа, включая рентгенофазовый и электронную микроскопию, расчетный метод с использованием системы множества кинетических уравнений, описывающих процессы синтеза сульфоалюминатного клинкера, а также стандартные методики определения физико-механических характеристик. Результаты подтверждены статистической обработкой и апробацией на научных конференциях.

Практическая проверка достоверности выполнена путём опытно-промышленной апробации разработанных составов – выпуска опытной партии сульфоалюминатного клинкера с использованием отходов вторичной переплавки алюминия и опытной проверки разработанного состава ремонтной гидроизоляционной сухой смеси. Полученные материалы продемонстрировали заявленные свойства, что подтверждает состоятельность научных положений и рекомендаций работы.

Таким образом, применённый комплекс методов исследования, статистическая обработка экспериментальных данных и положительные результаты опытно-

промышленных испытаний позволяют считать выводы и рекомендации диссертации обоснованными и достоверными.

4. Научная новизна

Уточнен механизм процессов минерало- и клинкерообразования, протекающих при синтезе САК в присутствии различных примесных элементов, заключающийся в том, что ионы Na^+ , K^+ , PO_4^{3-} , Cl^- взаимодействуют с промежуточными клинкерными фазами, образуя микроликвации, что приводит к снижению температуры образования сульфоалюмината кальция и майенита, а при охлаждении — внедряются в их кристаллические решетки, что приводит к повышению гидравлической активности.

Установлено, что лимитирующей стадией образования сульфоалюмината кальция при температуре 1350 °С является диффузия, кинетика процесса удовлетворительно описывается уравнениями Яндера и Ерофеева-Колмогорова. При снижении температуры обжига до 1250 °С увеличивается значение коэффициента «n» в уравнении Ерофеева-Колмогорова, что указывает на усиление влияния скорости химической реакции. Показано, что энергия активации процессов минералообразования для составов со шлаками вторичной переплавки алюминия значительно ниже, чем для традиционных систем с бокситом.

Научно обоснована и доказана целесообразность использования золы-уноса, доменного гранулированного шлака, известняка и метакАОлина при получении композиционных вяжущих на основе сульфоалюминатного цемента. Определены оптимальные диапазоны их содержания, обеспечивающие повышение прочности, плотности и эксплуатационных характеристик цементного камня.

5. Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в дополнении представлений о закономерностях синтеза сульфоалюмината кальция при различных температурах в присутствии примесных элементов.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

- оптимизированы режимы получения сульфоалюминатного клинкера в зависимости от вида и количества примесных элементов;
- установлено, что применение сульфоалюминатных цементов с минеральными добавками обеспечивает высокую плотность и прочность камня в различные сроки твердения;
- разработаны оптимальные составы композиционных вяжущих на основе сульфоалюминатного клинкера и минеральных добавок;
- проведено опытно-промышленное апробирование результатов исследования, разработаны рекомендации по оптимальному вещественному составу композиций.

6. Значимость полученных результатов для развития соответствующей отрасли науки

Полученные результаты расширяют научные представления о закономерностях клинкерообразования и минералообразования при получении сульфоалюминатного клинкера с использованием природного сырья и техногенных отходов, а также о процессах гидратации и структурообразования в системах на основе сульфоалюминатных цементов с применением минеральных добавок и пластификаторов. Установленные корреляции между составом сырьевой смеси, фазовым составом клинкера и эксплуатационными свойствами вяжущего создают научную основу для целенаправленного проектирования композиционных материалов с заданными характеристиками прочности и долговечности.

Экспериментально подтверждена возможность синтеза эффективных и экологически безопасных вяжущих веществ с использованием промышленных отходов, что открывает перспективы для развития низкоуглеродных и ресурсосберегающих технологий в производстве строительных материалов. Разработанные составы ремонтного гидроизоляционного вяжущего демонстрируют высокие эксплуатационные характеристики и подтверждают возможность практического использования научных результатов.

Таким образом, выполненная работа вносит вклад в углубление теоретических представлений о закономерностях структурообразования и гидратации в системах на основе сульфоалюминатного цемента, полученного с использованием природного и техногенного сырья. Полученные результаты формируют научные основы для разработки новых поколений сульфоалюминатных вяжущих и композиционных материалов с повышенными показателями физико-механических свойств.

7. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Предложенные в работе научно-технологические основы управления структурообразованием при получении сульфоалюминатного цемента и композиционных вяжущих на его основе могут быть использованы как методологическая база для разработки быстротвердеющих и высокопрочных строительных материалов, в том числе легких бетонов, сухих строительных смесей и ремонтных составов, обеспечивающих повышение эффективности и экологической устойчивости строительных технологий.

Рекомендуется использовать теоретические положения диссертационной работы при разработке лекционных курсов и ведении практических занятий в профильных образовательных учреждениях. Работа представлена на высоком профессиональном уровне, отражает глубокое знание предмета и содержит оригинальные идеи, полезные для совершенствования образовательной программы.

8. Замечания и рекомендации

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. В разделах 1.2 «Получение сульфоалюминатного клинкера» и 1.3 «Влияние различных факторов на процессы гидратации...» следовало бы четко обосновать, почему общепринятые методики и представления о механизмах гидратации, клинкеров, полученных на чистом сырье, не всегда применимы или требуют уточнения при работе со сложными техногенными отходами, содержащими примеси Na^+ , K^+ , PO_4^{3-} , Cl^- . Этот аналитический переход должен ясно показать, какие именно аспекты остаются недостаточно изученными, и обозначить, что именно будет исследовано в главах 3 и 4.

2. В главе 2 представлен химический состав используемых в работе материалов. В работе утверждается наличие в их составе примесей Na^+ , K^+ , PO_4^{3-} , Cl^- , влияющих на синтез САК и в последствии на свойства цементов. Важно указать содержание в исходных компонентах наличие этих элементов.

3. В главе 3 следовало бы уточнить взаимосвязь между условиями обжига, фазовым составом клинкера и его свойствами, включая нормальную густоту, сроки схватывания и прочностные показатели. Например, для составов 2 и 6 наблюдается значительное удлинение времени схватывания при высоких прочностных показателях – важно пояснить причины такого поведения и его связь с минералогией и фазовым содержанием сульфоалюмината кальция.

4. В главе 4 представлены детальные результаты исследования влияния различных микродобавок на процессы синтеза сульфоалюминатного клинкера. Однако в тексте недостаточно ясно объяснено, почему были выбраны именно эти добавки (NaCl , KNO_3 , CaHPO_4 , KCl , NaNO_3) и диапазон их концентраций. Следовало бы более четко обосновать роль каждой из добавок в процессах минералообразования и показать, каким образом они влияют на механизм формирования сульфоалюминатной фазы.

5. В разделе 4.4 желательно уточнить взаимосвязь между фазовым составом и прочностными характеристиками цементов, чтобы показать, какие именно структурные изменения приводят к повышению или снижению прочности. Такое пояснение сделает интерпретацию результатов более убедительной и позволит глубже понять влияние микродобавок на качество получаемого сульфоалюминатного цемента.

6. В главе 5 представлены интересные результаты, показывающие влияние минеральных добавок (золы-уноса, известняка, доменного гранулированного шлака и метакеолина) на свойства сульфоалюминатного цемента. Однако не всегда ясно объяснены причины различий в их воздействии на структуру и прочность цементного камня. Следует подробнее раскрыть механизмы взаимодействия добавок с продуктами

гидратации, особенно при образовании фаз C-S-H, C-A-S-H, этtringита, стратлингита и карбонатных гидроалюминатов кальция. Это позволило бы точнее понять, какие процессы способствуют повышению прочности и плотности структуры цемента.

7. В автореферате используется обозначение сульфоалюмината кальция как C_3A_3CS , тогда как в тексте диссертации встречается C_4A_3S . Необходимо единообразно использовать обозначение фазы во всех частях работы, чтобы избежать недоразумений и обеспечить точность минералогического описания.

Указанные замечания не носят принципиального характера и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы Мин Хеин Хтета.

9. Заключение

Диссертация Мин Хеин Хтета на тему «Получение сульфоалюминатного цемента и исследование его свойств» является завершенной научно-квалификационной работой, отличающаяся актуальностью и внутренним единством, в которой на основании проведенных автором исследований изложены новые научно-обоснованные технические, технологические или иные решения и разработки, имеющие существенное значения для развития отрасли строительных материалов в Российской Федерации и Республике Союз Мьянма, а именно, разработаны составы специальных сульфоалюминатных цементов при использовании промышленных отходов – шлаков вторичной переплавки алюминия и оптимальные составы композиционных вяжущих на основе сульфоалюминатного клинкера и минеральных добавок.

Результаты диссертации получены на основании исследований, проведенных на высоком научном и техническом уровнях, с применением современных методов исследования. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные автором, теоретически обоснованы и экспериментально апробированы. Представленные в работе результаты принадлежат Мин Хеин Хтету, они оригинальны, достоверны и отличаются научной новизной и практической значимостью.

Диссертационная работа соответствует критериям пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в действующей редакции Постановления Правительства Российской Федерации от 25.01.2024), с учетом соответствия паспорта специальности, а ее автор, **Мин Хеин Хтет, заслуживает присуждения** ему ученой степени **кандидата технических наук** по специальности 2.6.14 Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов.

Отзыв на диссертацию рассмотрен и одобрен на заседании кафедры технологии цемента и композиционных материалов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный

Отзыв составлен к.т.н., доцентом, заведующим кафедрой технологии цемента и композиционных материалов Мишиным Дмитрием Анатольевичем.


подпись

Дуюн Татьяна
Александровна