

M55

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

УДК 666.942.6

МЕЧАЙ АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОАКТИВНОГО БЕЛИТОВОГО ЦЕМЕНТА
МОДИФИЦИРОВАНИЕМ ЕГО СУЛЬФОАЛЮМОСИЛИКАТНОЙ
ДОБАВКОЙ

05.17.11 - Технология керамических, силикатных и тугоплавких
неметаллических материалов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Минск 1998

Работа выполнена в Белорусском государственном технологическом университете.

Научный руководитель доктор технических наук,
профессор Кузьменков М.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Демидович Б.К.;

кандидат технических наук,
ст.н.сотр. Туровский Л.Н.

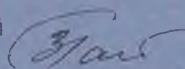
Оппонирующая организация Научно-исследовательское и
экспериментально-проектное
государственное предприятие
«Институт БелНИИС»

Защита состоится «19» января 1999 г. в 14⁰⁰ часов на заседании
совета по защите диссертаций Д. 02.08.03 в Белорусском государственном
технологическом университете, 220630, г. Минск, ул. Свердлова, 13а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского
государственного технологического университета.

Автореферат разослан «18» декабря 1998 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
кандидат технических наук



С.А. Гайлевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

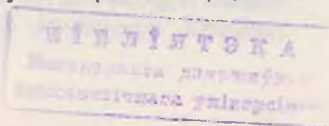
Актуальность темы. Современные тенденции развития экономики требуют более эффективного использования энергоресурсов и внедрения малоэнергоемких технологий в производстве вяжущих веществ. Уровень потребления энергоресурсов в промышленности строительных материалов, в частности, в производстве цемента в Беларуси и других государствах СНГ в 1.5-2 раза превышает уровень высокоразвитых европейских стран. Среди множества предлагаемых путей снижения энергозатрат при обжиге цементного клинкера наиболее перспективным представляется снижение его основности и получение цемента с высоким содержанием белитовой фазы (45-50%).

Данное направление особенно интенсивно разрабатывается во многих промышленно развитых странах. В то время как портландцементный клинкер обжигается при температуре 1450-1470°C, белитовый клинкер можно обжигать при 1300-1350°C, что позволяет экономить 10-15% тепловой энергии и существенно облегчить режим термической обработки сырьевой шихты. Вторым важным достоинством белитовых цементов является значительное увеличение прочности в поздние сроки твердения. Через 2 года прочность гидратированной белитовой фазы превышает прочность гидратированной алитовой фазы в 1.5-1.8 раза.

Недостатком обычных белитовых цементов является низкая гидравлическая активность в ранние сроки твердения, что затрудняет их практическое использование из-за отсутствия достаточно эффективных методов активации процессов гидратации белитовой фазы. В связи с этим весьма важной представляется разработка эффективных модификаторов, способных увеличить темпы набора прочности белитовых цементов в ранний период твердения и обеспечить их строительно-технические свойства на уровне аналогичных свойств высокообжигового портландцемента. Использование для получения таких добавок фосфогипса позволит также решить проблему его масштабной и безопасной утилизации и значительно улучшить экологическую обстановку в гомельском регионе.

Связь работы с научными темами. Тема диссертационной работы соответствует научному направлению кафедры химической технологии вяжущих материалов Белорусского государственного технологического университета. Выполнение исследований в данном направлении предусматривалось планом НИР в рамках Республиканской научно-технической программы «Природопользование и охрана окружающей среды на 1996-2000 гг. и перспективу» (задание 3.3.3.7. «Разработать научное обоснование по оптимизации сложных композиций промышленных отходов гомельского региона с целью их вторичной переработки и утилизации, технологическую и конструкторскую документацию по переработке

21ар



промышленных отходов»); в рамках отдельного проекта фундаментальных и поисковых исследований, выполняемых по заказу Министерства образования Республики Беларусь, ГБ 97-012 (задание «Разработка физико-химических основ получения низкообжиговых композиционных цементов» на 1997-1998 гг.)

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является получение высокоактивного белитового цемента путем его модифицирования сульфоалюмосиликатной добавкой на основе фосфогипса, мела и низко- и среднеалюминатных глин Беларуси. Активированный белитовый цемент должен обладать физико-механическими свойствами на уровне аналогичных свойств промышленного портландцемента.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать оптимальный состав и режим обжига белитового клинкера с максимальной гидравлической активностью и исследовать его свойства;

- разработать принципы управления низкотемпературным синтезом САСД с целью получения необходимой минералогической основы;

- изучить минералогический состав САСД и влияние примесей на фазообразование в системе «фосфогипс - мел - глина»;

- изучить механизм активирующего действия САСД на гидратацию белитовой фазы и белитового цемента в целом;

- разработать принципы управления гидратацией активированного белитового цемента за счет целенаправленного структурообразования, в основе которого лежат кристаллизационные процессы;

- разработать технологический процесс получения активированного белитового цемента и рассчитать его экономическую эффективность;

- провести опытно-промышленную апробацию технологического процесса получения сульфоалюмосиликатной добавки, белитового клинкера и испытать физико-механические свойства полученного белитового цемента.

Научная новизна. Разработаны принципы управления минералогическим составом сульфоалюмосиликатной добавки на основе фосфогипса и низко- и среднеалюминатных глин путем модифицирования сырьевой смеси карбонатом кальция. Впервые исследован механизм влияния Fe_2O_3 , TiO_2 , Na_2O и K_2O на фазовый состав САСД и установлено их негативное воздействие на процесс образования сульфоалюмината и сульфосиликата кальция.

Установлено, что в цементном камне в присутствии САСД изменяются условия формирования, структура и состав продуктов гидратации в сторону увеличения количества хорошо закристаллизованных низкоосновных гидросиликатов кальция с различным строением кристаллов типа гиролита, афвиллита, $CSH(B)$, создающих прочный пространственный

кристаллический каркас. Выявлено активирующее действие САСД на процесс кристаллизации гидросиликатного геля, вызванное присутствием этtringита и гидросульфосиликата кальция, выполняющих роль центров кристаллизации, что приводит к увеличению интенсивности диффузии воды к непрореагировавшей поверхности и ускорению процесса гидратации белитовой фазы

Практическая значимость. Разработан состав и режим обжига белитового клинкера на основе низкоалюминатной глины с повышенным содержанием кристаллического кремнезема и сульфоалюмосиликатной добавки на основе фосфогипса, мела и низко- и среднеалюминатных глин. Оригинальность разработанного состава защищена заявкой на изобретение «Вяжущее» № 961069 от 20.11.96 г. и № а19980584 от 18.06.98 г. Разработан технологический процесс получения сульфоалюмосиликатной добавки и активированного белитового цемента на технологической линии цементного завода ОАО «Красносельскцемент».

Изучены физико-механические свойства полученного белитового цемента. Показано, что высокий темп набора прочности является предпосылкой целесообразности использования активированного белитового цемента в производстве бетона и сокращения тепловых затрат при его пропаривании примерно на 50%. Физико-механические свойства полученного цемента и бетона на его основе не уступают, а по некоторым показателям превосходят аналогичные свойства портландцемента и соответствующего бетона. Проведена успешная опытно-промышленная апробация технологии получения белитового клинкера и сульфоалюмосиликатной добавки.

Экономическая значимость. Экономическая эффективность технологии активированного белитового цемента по сравнению с портландцементом будет достигнута за счет снижения температуры обжига клинкера на 100-130°C, а также замены 3% импортируемого гипсового камня и 7% высокообжигового клинкера (1330-1360°C) на низкообжиговую САСД (800-900°C). Расчетное снижение производственных затрат на 1 т белитового клинкера по сравнению с портландцементным клинкером составит 7.68%; 1 т активированного белитового цемента - 8.36%. Ожидаемый годовой экономический эффект при выпуске белитового цемента в количестве 300 000 т/год составит 570 545 долл. США.

При производстве сборного бетона и железобетона экономический эффект будет достигнут за счет снижения примерно на 50% расхода тепловой энергии при пропаривании, что при использовании 300 000 т/год активированного белитового цемента составит около 4 200 тыс. долл. США.

На защиту выносятся:

- состав и режим получения белитового клинкера;

- разработанные принципы управления синтезом САСД с необходимой минералогической основой;
- новая интерпретация результатов исследования влияния примесей на процесс минералообразования и фазовый состав САСД;
- состав активированного белитового цемента;
- результаты исследования активирующего действия САСД на процесс гидратации белитовой фазы и белитового цемента в целом;
- результаты изучения физико-механических свойств активированного белитового цемента и бетона на его основе;
- технологический процесс производства САСД и активированного белитового цемента.

Участие автора. Автор диссертации принимал непосредственное участие в постановке задач исследования, проведении научных экспериментов, обсуждении результатов экспериментальных данных и их научной интерпретации, в подготовке докладов и публикаций, проведении опытно-промышленных испытаний технологического процесса получения белитового клинкера и сульфоалюмосиликатной добавки и физико-механических свойств активированного белитового цемента.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы докладывались на: 1 (9) Международном совещании по химии и технологии цемента (Москва, 1996 г.), 2 научно-технической конференции «Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии» (Гродно, 1996 г.), научно-техническом семинаре «О роли научно-технических достижений в снижении себестоимости производства строительных материалов Республики Беларусь» (Минск, 1997 г.), Международной научно-технической конференции «Разработка импортзамещающих технологий и материалов в химико-лесном комплексе» (Минск, 1997 г.), 13 Международной конференции по строительным материалам (Веймар, 1997 г.), Международной конференции «Промышленность стройматериалов и стройиндустрия, энерго- и ресурсосбережение в условиях рыночных отношений» (Белгород, 1997 г.), 3 научно-технической конференции «Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии» (Гродно, 1998 г.), научно-техническом семинаре «Создание новых конкурентноспособных ресурсо- и энергосберегающих технологий производства материалов и конструкций» (Минск, 1998 г.), научно-техническом семинаре «Пути энергосбережения при производстве строительных материалов и конструкций» (Минск, 1998 г.).

Опубликованность результатов. Основные положения диссертации опубликованы в 14 печатных работах: 8 - статьях, 6 - тезисах докладов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 6 глав, основных результатов и выводов, списка использованных источников и приложений.

Объем диссертации - 217 листов машинописного текста. Диссертация содержит 63 рисунка на 63 страницах, 26 таблиц на 11 страницах, 182 литературных источника на 14 страницах, 5 приложений на 20 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава первая. Обзор литературы. В данной главе рассмотрены основные направления повышения гидравлической активности низкоосновных клинкеров, их преимущества и недостатки, а также обоснование цели исследования. В основу известных способов получения высокоактивных белитовых цементов, позволяющих использовать многочисленные преимущества данной технологии (низкая энергоемкость, высокая прочность в поздние сроки твердения и т.д.), положены работы Л.Г. Судакаса, А.П. Осокина, В.Д. Барбанягрэ, Б.С. Альбаца, Й. Штарка, Т.В. Кузнецовой, А.И. Бойковой, М.М. Сычева, Л.Б. Сватовской и др.

Анализ литературных данных показал, что существует несколько путей решения данной проблемы:

- специальные режимы обжига и охлаждения;
- кристаллохимическая активация;
- модифицирование клинкеров алюминатной и сульфоалюминатной фазами;
- активация процессов гидратации белитовых цементов с помощью различных добавок.

Вышеперечисленные способы имеют свои достоинства и недостатки, однако по совокупности технологических и технико-экономических факторов была выбрана химическая активация гидратационных процессов путем использования специально синтезированных добавок, вводимых в цемент при помоле. Данное направление является наиболее простым и не обременено недостатками, присущими другим способам получения высокоактивных белитовых клинкеров (необходимость сложного аппаратного оформления процессов обжига и охлаждения, высокая стоимость эффективных модификаторов белитовой фазы, специфические свойства алюминатно- и сульфоалюминатно-белитовых клинкеров и т.д.), однако требует использования высокоэффективных активаторов. Поэтому существует необходимость систематических исследований в области получения добавки, обеспечивающей интенсификацию процессов гидратации и твердения цемента на основе рядового белитового клинкера.

Принимая во внимание литературные данные по получению сульфоалюминатно- и сульфосиликатно-белитовых клинкеров, использованию их в качестве добавки в портландцемент, а также модифицированию портландцементов сульфоалюминатными добавками, сформулировано

научное предположение возможности синтеза сульфоалюмосиликатной добавки, включающей сульфоалюминат и сульфосиликат кальция, ангидрит, аморфный кремнезем, и использования ее для химической активации белитового клинкера. Сырьем для получения такой добавки могут служить карбонатные и алюмосиликатные породы, а также фосфогипс, включающий в своем составе эффективные минерализаторы (фтор- и фосфорсодержащие соединения), обеспечивающие получение необходимой минералогической основы добавки при низкотемпературном синтезе.

Глава вторая. Характеристика исходных материалов и методов исследований. Для синтеза белитовых клинкеров использовалось традиционное цементное сырье: мел, глины и пиритные огарки. В качестве одного из контрольных образцов использовался промышленный портландцемент, полученный на основе того же сырья. Сульфоалюмосиликатные добавки получали на основе фосфогипса Гомельского химического завода, получаемого по дигидратной технологии переработки апатитового концентрата, глин различного состава и мела. Химический состав глин и фосфогипса представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав глин и фосфогипса

Оксиды	Глина				Фосфогипс
	№1	№2	№3	№4	
SiO ₂ общ.	58.1	43.9	61.5	51.2	1.3
SiO ₂ своб.	32.6	9.6	30.4	14.1	1.3
Al ₂ O ₃	9.5	15.6	16.9	16.6	0.0
Fe ₂ O ₃	4.1	6.71	6.9	7.5	0.3
CaO	9.2	11.4	1.5	5.4	38.5
TiO ₂	0.3	0.1	0.0	0.8	0.1
MgO	2.7	2.6	1.2	2.7	0.2
K ₂ O	2.6	3.1	0.2	4.0	0.1
Na ₂ O	1.7	1.3	1.8	0.7	0.1
SO ₃	0.2	0.3	0.0	0.0	54.8
P ₂ O ₅	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6
F _{общ}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
ппп	11.2	14.7	10.4	11.2	11.2

Химический анализ сырьевых материалов и цементных клинкеров на содержание оксидов проводился по общепринятым стандартным методикам. Содержание свободного CaO в клинкерах определялось с помощью этилглицератного метода, а содержание связанного SO₃ в сульфоалюмосиликатных добавках - по методу Т.В. Кузнецовой. Определение пуццоланизационного потенциала сульфоалюмосиликатных добавок

осуществлялось по методу поглощения добавкой извести из известково-го раствора.

Физико-механические свойства цемента определялись в соответствии с ГОСТ 310.3-76 и ГОСТ 310.4-81.

Для изучения физических и химических превращений в материалах и смесях при нагревании, установления фазового состава и исследования микроструктуры клинкеров, сульфатомосиликатных добавок и продуктов гидратации цементов использовались следующие методы: дифференциально-термический анализ (Q-1500D), рентгенофазовый анализ (ДРОН-3), ИК-спектроскопия (Specord-IR-75), растровая электронная микроскопия (РЭМ-100У).

Результаты испытаний подвергались статистической обработке и представлены в диссертации в виде таблиц, графиков и диаграмм.

Глава третья. Получение и исследование белитовых клинкеров. С целью уточнения роли природы алюмосиликатного компонента и поиска оптимального режима получения белитовых клинкеров с максимально возможной гидравлической активностью были проведены исследования по изучению влияния состава глин, модульных характеристик, а также температуры обжига на степень завершения процессов минералообразования клинкеров. Для получения клинкеров использовались глины с повышенным содержанием кристаллического SiO_2 (около 34%) (глина № 1) и с относительно высоким содержанием Al_2O_3 (15-16%) (глина № 2).

Режим подготовки сырьевой смеси, обжига и охлаждения максимально соответствовал производственным условиям. Учитывая необходимость получения клинкера с 15-25% алита, активирующего процесс гидратации белитовой фазы и обеспечивающего необходимую концентрацию $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при гидратации, а также обычного содержания C_4AF (12-16%), область оптимальных составов, определенная по содержанию свободного CaO , для клинкера на основе глины № 1 находилась в пределах $\text{KH}=0.74-0.78$; $n=2.65-3.05$; $p=0.80-0.95$; на основе глины № 2 - $\text{KH}=0.74-0.76$; $n=1.85-1.95$; $p=1.4-1.6$

Оптимальная температура обжига для данных условий составила 1350°C , время выдержки - 30 минут. Снижение температуры до 1300°C привело к повышенному содержанию свободного CaO (до 6-8%) и саморассыпанию клинкера вследствие перехода $\beta \rightarrow \gamma\text{-C}_2\text{S}$, вызванного недостаточным завершением процесса легирования белитовой фазы. Повышение температуры обжига до 1400°C привело к необратимому процессу распада алита из-за насыщения поверхностного слоя его кристаллов ионами Al^{3+} и Fe^{3+} , вызванного прекращением их роста вследствие полного усвоения извести.

Исследование процессов минералообразования клинкеров на основе обеих глин с помощью ДТА и РФА показало, что при использовании глины с повышенным содержанием кристаллического SiO_2 имеет место

эффект позднего белитообразования, обнаруженный ранее Л.Г. Судаком с сотрудниками. В клинкере на основе глины №1 максимум кристаллизации белита смещается в область высоких температур на 60-70°C, что вызывает уменьшение термической пассивации его кристаллов и микроструктуры клинкера в целом вследствие сокращения временного интервала между формированием белитовой фазы и полным завершением минералообразования.

Электронно-микроскопическое исследование показало более совершенную микроструктуру клинкера на основе глины №1 (рис.1а). Мелкокристаллическая структура является следствием пониженной температуры обжига и позволила предположить высокую химическую активность клинкера. Клинкер на основе глины №2 (рис.1б) характеризуется неотчетливой кристаллизацией и значительным количеством светлых скоплений неусвоенной извести и стекловидной фазы, что вызвано повышенным содержанием Al_2O_3 и высокой вследствие этого вязкостью расплава.



Рис.1. Микроструктура белитовых клинкеров: а - на основе глины №1 ($KH=0.78$; $n=2.85$; $p=0.85$); б - глины №2 ($KH=0.78$; $n=1.95$; $p=1.51$)

Установленные данные позволили сделать вывод о целесообразности использования алюмосиликатного компонента с повышенным содержанием кристаллического SiO_2 для получения белитовых клинкеров оптимальной микроструктуры, что является предпосылкой для их повышенной гидравлической активности. При этом следует избегать использования глин с крупнодисперсным SiO_2 (размер частиц свыше 0.3-0.4 мкм).

Оптимальный состав белитовых клинкеров включает 50-55% C_2S , 20-25% C_3S , 2-4% C_3A , 14-16% C_4AF . По сравнению с портландцемент-

ным, полученные клинкера имеют более высокую пористость (14-17% против 7-8%), что обеспечивает их хорошую размалываемость.

Глава четвертая. Получение и исследование сульфоалюмосиликатных добавок (САСД). Поиск оптимального состава и режима получения САСД осуществлялся по прочностным показателям цементного камня. Установлено, что наиболее высокие результаты обеспечивают добавки на основе глин №2 и №3, сырьевая смесь которых включает 30% глины, 0-10% мела и 60-70% фосфогипса. Оптимальная температура обжига составляет 800-900°C.

Необходимо отметить, что не все использованные глины обеспечивают необходимое качество добавки (в частности, глина №4), что связано с влиянием их химического состава, однако модифицирование сырьевой смеси САСД карбонатом кальция (мелом) приводит к стабильному повышению их качества и значительному росту прочности цементного камня.

Термодинамический анализ показал возможность образования в системе «фосфогипс-мел-глина» при температуре 800-900°C сульфоалюмината и сульфосиликата кальция, однако обнаружил потенциально сильное влияние примесей (в частности, Fe_2O_3 , Na_2O и K_2O) на процесс формирования необходимой минералогической основы. Обнаружена также высокая термодинамическая вероятность взаимодействия геленита, являющегося гидравлически инертным веществом, с избыточным количеством CaO с образованием моноалюмината кальция и белита.

С помощью РФА установлено, что основными фазами САСД являются ангидрит, сульфосиликат и сульфоалюминат кальция и кремнезем.

Для определения влияния примесей на фазообразование в данной системе в сырьевую смесь САСД, включавшую 70% фосфогипса и 30% глины, дополнительно вводили Na_2O , K_2O , Fe_2O_3 , TiO_2 и CaO в различных количествах. Анализ рентгенограмм показал, что щелочные оксиды активно препятствуют образованию сульфоалюмината и сульфосиликата кальция, связывая значительное количество минералообразующих оксидов в щелочные силикаты и алюмосиликаты. Fe_2O_3 и TiO_2 также являются вредными примесями, образуя твердые растворы на основе сульфоалюмината кальция, являющиеся малоактивными соединениями. Кроме того, данные оксиды активно связывают CaO , образуя ферриты кальция, титанит $CaO \cdot TiO_2 \cdot SiO_2$ и перовскит $CaO \cdot TiO_2$. Введение в сырьевую смесь CaO привело к значительному увеличению количества высокоактивных сульфоминералов, в частности, сульфосиликата кальция, а также к образованию твердых растворов на основе C_2S и CA , включавших вследствие большой емкости вредные примеси, на что указывали диффузный характер и значительное смещение соответствующих рефлексов.

Прочностные показатели цементного камня с модельными САСД и их химический анализ подтвердили сделанные выводы (табл. 2).

Таблица 2.

Влияние примесей на количество связанного SO_3 в САСД и прочность цементного камня

Примесь	Количество, масс.%	Связанный SO_3 , масс.%	Прочность, МПа, в возрасте, сут.			
			1	3	7	28
Na_2O	2	6.2	25.1	80.3	69.0	75.6
K_2O	2	6.3	18.4	75.7	73.9	78.3
Fe_2O_3	4	13.4	19.6	48.3	56.7	66.7
TiO_2	1	8.8	23.5	46.6	59.4	69.2
CaO	4	13.6	42.4	82.2	105.3	112.9
контрольный		10.3	35.4	72.1	90.6	102.3

Высокое значение прочности при введении в САСД щелочных оксидов в возрасте 3 суток и последующий ее спад объясняется дисбалансом между этрингитообразованием и формированием плотной структуры в результате возможного активирующего влияния на процесс твердения щелочных силикатов, образовавшихся при взаимодействии Na_2O и K_2O с кристаллическим и аморфным SiO_2 . Повышенное количество связанного SO_3 при введении в САСД Fe_2O_3 вызвано образованием сульфоалюмоферрита кальция.

Таким образом, введение в сырьевую смесь CaO компенсирует негативное влияние вредных примесей. Оптимальная концентрация CaO в сырьевой смеси является индивидуальной для каждой глины и зависит от содержания в ее составе Al_2O_3 , примесей и соотношения между ними.

Накопленный статистический материал позволил сформулировать научно обоснованный подход к выбору глинистого сырья и прогнозированию свойств САСД в зависимости от его химического состава. Оптимизация сырьевой смеси проводилась по содержанию Na_2O , K_2O , Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO и Al_2O_3 . Найдены области оптимальных значений концентраций данных оксидов.

Расчеты показали, что сульфоалюмосиликатная добавка, обеспечивающая оптимальные прочностные показатели, имеет следующий минералогический состав: сульфоминералы - 50-55%; ангидрит - 30-35%; аморфный SiO_2 - 6-7%; кристаллический SiO_2 , CA , C_2S - остальное.

Для исследования влияния фтор- и фосфорсодержащих соединений на процесс минералообразования использовались сырьевые смеси, включавшие в качестве сульфатсодержащего компонента фосфогипс и природный гипс. С помощью ДТА установлено, что при использовании фосфогипса снижение температуры разложения MgCO_3 составляет 20°C , CaCO_3 - 60°C , гидросиликатов кальция - 40°C , а значительная разница в

площади, и интенсивности эндозффектов свидетельствует о снижении теплоты разложения соответствующих соединений.

Определение количества фтора, выделяющегося при обжиге сырьевой смеси САСД, показало, что его концентрация в отходящих газах не превышает допустимых санитарных норм, что связано с нейтрализацией кислых фторсодержащих соединений карбонатом кальция при приготовлении сырьевого шлама.

ИК-спектроскопическое и рентгенофазовое исследования спеков, обожженных при различных температурах, позволило установить, что в сырьевой смеси, включающей фосфогипс, формирование необходимой минералогической основы завершается на 150-200°C раньше, что обеспечивает наличие в спеке аморфного SiO_2 , играющего важную роль в процессе гидратации.

Вышеизложенные исследования позволили предположить, что САСД полученного минералогического состава активно влияет на гидратационные процессы.

Глава пятая. Исследование процесса гидратации и твердения активированного белитового цемента. Исследование гидратационных процессов проводилось на образце белитового цемента оптимального состава, определенного по прочностным показателям. Подтвердились сделанные выше предположения о различной гидравлической активности клинкеров на основе глин № 1 и № 2. Прочность цементного камня, полученного из клинкера на основе глины № 1, была выше на 12-15%. Максимальную прочность показал состав с $\text{KH}=0.78$; $n=2.85$; $p=0.85$, включающий 8-12% САСД.

Сложность механизма гидратации цемента, вызванная наложением различных процессов, обусловило целесообразность исследования более простой системы - «белит - САСД». Как видно из данных табл. 3, темпы роста прочности активированного белитового камня значительно выше, чем у образца мономинерального белита, в том числе и в поздние сроки твердения.

Таблица 3

Прочность активированного и бездобавочного белитового камня

Состав вяжущего	Прочность при сжатии, МПа, в возрасте, сутки				
	1	3	7	28	360
90% C_2S ; 10% САСД	3.0	13.2	27.0	36.2	61.5
100% C_2S	3.6	6.6	11.4	16.4	41.3

С помощью ДТА обнаружено существенное изменение процесса гидратации белита в присутствии САСД, что выражается в более низком содержании межслоевой гидратной воды, являющимся предпосылкой более плотной структуры белитового камня, а также в повышенном содер-

жании низкоосновных гидросиликатов кальция. Рентгенофазовый, ИК-спектроскопический и электронно-микроскопический анализы позволили установить более высокую степень гидратации и лучшую закристаллизованность гидросиликатных новообразований в образце с САСД. Характер гидратации остается неизменным и в более поздние сроки твердения (360 суток). Микроструктура продуктов гидратации белитовой фазы в присутствии добавки характеризуется присутствием блочных скоплений кристаллов гидросиликатов кальция различного строения, заполняющих поры и уплотняющих твердеющую систему. Вместе с тем, в активированном белитовом камне не установлено наличие этtringита, что обусловлено высоким пуццоланизационным потенциалом добавки и отсутствием в растворе извести, необходимой для его стабильного существования.

Комплексное изучение процесса гидратации белитового цемента с САСД показало, что активирующее влияние добавки в данном случае более ярко выражено в связи с параллельной активацией твердеющего цементного камня другими составляющими цементного клинкера (C_2S и C_3A). Следствием этого являются прочностные показатели исследуемого и контрольных цементов (табл. 4).

Таблица 4
Прочность активированного и контрольных цементов

Состав цемента	Прочность при сжатии, МПа, в возрасте, сутки				
	1	3	7	28	360
90% БК; 10% САСД	36.5	78.4	102.1	114.0	148.1
97% БК; 3% ГК	20.3	45.2	63.6	75.5	118.8
97% ПК; 3% ГК	26.0	56.7	80.0	94.5	129.5

Примечание. БК - белитовый клинкер; ПК - портландцементный клинкер; ГК - гипсовый камень (здесь и далее по тексту).

С помощью дифференциально-термического и рентгенофазового анализов установлено, что в начальный период гидратации (1-3 суток) в цементном камне с САСД образуются этtringит и гидросульфосиликат кальция, а также идет интенсивный процесс пуццоланизации, сопровождающийся появлением большого количества низкоосновных гидросиликатов кальция типа гиролита, афвиллита, $CSH(B)$. При этом концентрация извести в растворе является все же достаточной для стабильного существования этtringита.

ИК-спектроскопическое исследование обнаружило более высокое содержание гидратной воды в образце с добавкой, что свидетельствует о повышенном количестве продуктов гидратации.

В целом комплекс физико-химических методов позволил сделать вывод о повышении степени гидратации силикатных фаз, в частности, белитовой, в присутствии сульфатоалюмосиликатной добавки.

Электронно-микроскопическое исследование продуктов гидратации показало наличие в активированном цементном камне длинных призматических кристаллов этtringита и гидросульфосиликата кальция размером 15–25 мкм, уплотняющих и армирующих твердеющую систему. Кроме того, выявлено их активирующее воздействие на процесс кристаллизации гидросиликатного геля, что выразилось в присутствии большого количества волокнистых кристаллов тоберморита, заполняющих поры и сшивающих блочные скопления аморфной массы, чешуйчатых и пластинчатых кристаллов гидросиликатов кальция различной основности (рис. 2). В то же время микроструктура контрольных образцов характеризуется преобладанием аморфной фазы, обволакивающей непрореагировавшие зерна и препятствующей их дальнейшей гидратации, а также менее плотной структурой.

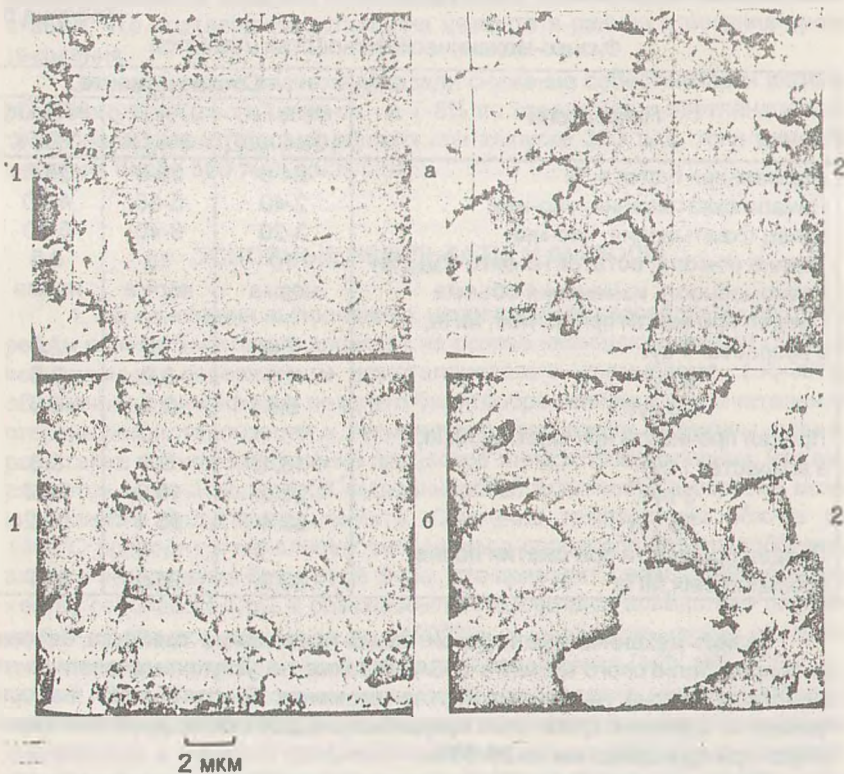


Рис. 2. Микроструктура цементного камня из активированного (1) и бездобавочного (2) белитового цемента в возрасте 1 (а) и 3 (б) суток.

Вышеописанные тенденции процессов гидратации белитового цемента с САСД характерны и для более поздних сроков твердения, что свидетельствует о стабильно высоком активирующем потенциале добавки.

Резюмируя результаты проведенных исследований, можно утверждать, что использование для активации белитового цемента добавки с повышенным содержанием сульфосиликата кальция, достигнутым за счет целенаправленного управления минералогическим составом САСД, позволило исключить возможное негативное влияние сульфоалюмината кальция при гидратации (неравномерность изменения объема и расширения цементного камня), обеспечив в то же время физико-механические свойства, не уступающие аналогичным свойствам портландцемента. Это подтвердилось испытаниями активированного белитового цемента в независимой аккредитованной лаборатории (табл. 5).

Таблица 5.

Физико-механические свойства цементов

Показатели	Состав цемента		
	90% БК, 10% САСД	97% БК, 3% ГК	97% ПК 3% ГК
Нормальная плотность, %	24.6	25.8	26.0
Начало схватывания, час-мин	2-40	5-50	4-40
Конец схватывания, час-мин	3-20	6-40	5-50
Тонина помола, остаток на сите R ₀₀₈ (%)	10	10	8.5
Равномерность изменения объема	норма	норма	норма
Предел прочности при изгибе, МПа, в возрасте: 1 сут.	2.6	1.8	2.2
3 сут.	4.1	3.2	3.6
28 сут.	6.6	5.2	6.0
Предел прочности при сжатии, МПа, в возрасте: 1 сут	13.1	6.1	8.8
3 сут.	25.5	15.9	23.2
28 сут.	53.4	38.1	50.2
Предел прочности при сжатии после пропаривания, МПа	33.3	26.5	31.7

Физико-механические и строительно-технические свойства бетона на основе белитового цемента с САСД также не уступали аналогичным свойствам бетона на основе портландцемента. Высокий темп набора прочности в ранние сроки стал предпосылкой для сокращения тепловых затрат при пропаривании на 30-50%.

Глава шестая. Разработка технологического процесса производства высокоактивного белитового цемента с САСД. На основании резуль-

татов физико-химических исследований разработана принципиальная технологическая схема производства САСД по мокрому способу, которая может быть реализована на технологических линиях цементных, известковых и керамзитовых заводов. Белитовый клинкер может быть получен на цементных заводах без дополнительных капитальных вложений. Высокая технологичность процесса получения низкообжигового белитового клинкера подтверждена полупромышленными испытаниями с использованием газопламенных печей.

Проведена успешная промышленная апробация технологии получения САСД на Петриковском керамзитовом заводе и осуществлен выпуск ее опытной партии. Использование вращающейся печи (3 x 60 м) обеспечило заданный температурно-временной режим обжига и получение гранулированного продукта с необходимыми физико-химическими свойствами, что подтвердили испытания цемента в ранние и поздние сроки твердения.

Экономические расчеты показали снижение себестоимости активированного белитового цемента на 7-8% по сравнению с портландцементом. Планируемый годовой эффект при выпуске 300 тыс. тонн цемента составит более 500 тыс. долл. США.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основании выполненных исследований разработаны состав и режим обжига белитового клинкера на основе низкоалюминатной глины с повышенным содержанием кристаллического кремнезема (34-36%), обеспечивающие эффект позднего белитообразования и незначительную степень рекристаллизации и термической пассивации структуры клинкера, а также полное завершение процессов минералообразования, что выражается в его повышенной гидравлической активности в составе активированного белитового цемента. Снижение температуры обжига до 1300°C приводит к неполному завершению процессов минералообразования и легирования белитовой фазы, что приводит к повышенному количеству свободного СаО и саморассыпанию клинкера вследствие перехода $\beta \rightarrow \gamma$ -C₂S, а повышение ее до 1400°C вызывает термическую пассивацию структуры и необратимый процесс распада алита [152, 153, 155].

2. Разработаны химические основы управления низкотемпературным синтезом (800-900°C) сульфоалюмосиликатной добавки на основе фосфогипса и низко- и среднеалюминатных глин с различным содержанием примесных соединений путем модифицирования сырьевой смеси дополнительным количеством карбоната кальция (мела), что обеспечивает получение необходимой минералогической основы, а также предотвращает вредное газовыделение при обжиге за счет нейтрализации кис-

лых фтор- и фосфорсодержащих соединений при приготовлении сырьевого шлама. Необходимая концентрация CaCO_3 в сырьевой смеси является индивидуальной для каждой глины и зависит от содержания в ее составе Al_2O_3 , вредных примесей и соотношения между ними [152, 153, 163, 180].

3. Оптимальный фазовый состав САСД содержит 50-55% сульфо-минералов, 30-35% ангидрита, 6-7% аморфного SiO_2 . Установлено негативное влияние на качество САСД примесей Fe_2O_3 , K_2O , Na_2O и TiO_2 , препятствующих образованию сульфоалюмината и сульфосиликата кальция и приводящих к образованию малоактивных и балластных соединений. В то же время фтор- и фосфорсодержащие вещества, имеющиеся в составе фосфогипса, оказывают минерализующее действие и обеспечивают снижение температуры обжига на 150-200°C, а также наличие вследствие этого в спеке активного SiO_2 [158-162].

4. Сульфоалюмосиликатная добавка значительно активизирует процессы гидратации и твердения как белитовой фазы, так и белитового цемента в целом. Установлено, что в ее присутствии изменяются условия формирования, структура и состав продуктов новообразований в сторону увеличения количества хорошо закристаллизованных низкоосновных гидросиликатов кальция с различным строением кристаллов типа гиролита, афвиллита, $\text{CSH}(V)$, создающих прочный пространственный кристаллический каркас, причем ускоренная кристаллизация гидросиликатного геля, повышенное количество которого образуется вследствие интенсивной пуццоланизации цементного камня аморфным SiO_2 , происходит за счет наличия этtringита и гидросульфосиликата кальция, выполняющих роль центров кристаллизации, а также армирующих и уплотняющих твердеющую систему. Необходимая для стабильного существования этtringита концентрация $\text{Ca}(\text{OH})_2$ обеспечивается оптимальным количеством алитовой фазы в клинкере (20-25%) [153, 163-165, 178-180].

5. Разработан состав вяжущего, включающий белитовый клинкер и 6-14% САСД, физико-механические свойства которого не уступают, а по некоторым показателям превосходят аналогичные свойства портландцемента. Полученное вяжущее характеризуется высокой морозостойкостью, устойчивостью к действию агрессивных сред, а также быстрым темпом набора прочности, что позволяет сократить тепловые затраты при пропаривании бетона примерно на 50% [153, 162-165].

6. Разработана принципиальная технологическая схема получения САСД и активированного белитового цемента. Снижение затрат при производстве 1 т белитового клинкера составит 7.68%; 1 т белитового цемента с САСД - 8.36%. Годовой экономический эффект при выпуске 300 тыс. т/год составит 570 545 долл. США [160, 161, 163, 180].

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Переработка фосфогипса на сульфоалюминатную добавку к цементу / М.И.Кузьменков, Т.С.Куницкая, А.А.Сакович, А.А.Мечай // Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии: Труды 2 науч.-техн. конф., Гродно, 8-9 окт. 1996 / Гродн. гос. университет им. Я Купалы - Гродно, 1997.-С. 176-181.
2. Kuzmenkov M.I., Kunizkaja T.S., Metschei A.A. Herstellung von hochaktivem Belitzement / 13 Internationale Baustofftagung.-В. 2.-Weimar: 24-26 September -1997.-S. 415-420.
3. Получение высокоактивного цемента для беспропарочной технологии бетона / М.И.Кузьменков, Т.С.Куницкая, А.А.Сакович, А.А.Мечай // Промышленность строительных материалов и стройиндустрия, энерго- и ресурсосбережение в условиях рыночных отношений: Сб. докл. Междун. конф., Белгород, 6-9 окт. 1997 / Белгородская гос. технол. акад. строит. мат-лов.-Белгород, 1997.-ч. 1.-С. 91-95.
4. Получение высокоактивного белитового цемента / М.И. Кузьменков, Т.С.Куницкая, А.А.Мечай, А.А.Сакович, // Промышленность строительных материалов и стройиндустрия, энерго- и ресурсосбережение в условиях рыночных отношений: Сб. докл. Междун. конф., Белгород, 6-9 окт. 1997 / Белгородская гос. технол. акад. строит. мат-лов.-Белгород, 1997.-ч. 1.-С. 87-90.
5. Кузьменков М.И., Куницкая Т.С., Мечай А.А. Получение высокоактивного белитового цемента: Экспресс-обзор / АО «Центр информации и эконом-х. исследований в стройиндустрии - ВНИИЭСМ».-М., 1997.-С. 3-6. (Пром-ть строит. мат-лов. Сер. 1, Цементная и асбестоцементная пром-ть, Вып. 6).
6. Кузьменков М.И., Куницкая Т.С., Мечай А.А. Повышение гидравлической активности белитового цемента / Цемент и его применение.-1998.-№ 3.-С. 22-24.
7. Кузьменков М.И., Мечай А.А., Куницкая Т.С. Влияние состава глины на минералообразование и свойства сульфоалюмосиликатной добавки к низкоосновным цементам /Цемент и его применение.-1998.-№ 6.-С. 21-23
3. Кузьменков М.И., Куницкая Т.С., Мечай А.А. Термохимическая активация низкоосновного клинкера // Тез. докл. I Междун. (9-го) совещ. по химии и технологии цемента.-М.: РХТУ.-1996.-С. 197-198.
9. Переработка фосфогипса на сульфоалюминатную добавку к цементу / М.И.Кузьменков, Т.С.Куницкая, А.А.Сакович, А.А.Мечай // Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии: Тез. докл. 2 науч.-техн. конф., Гродно, 8-9 окт. 1996 / Гродн. гос. университет им. Я Купалы - Гродно, 1997.-С. 186-187.

10. Зданович А.И., Мечай А.А. Получение малоэнергоёмкого белитового цемента // Тез. докл. 3 республ. науч. конф. студентов Республики Беларусь, Минск, 14-16 мая 1997 / БГУ -Минск, 1997.-ч. 5.-С. 263-264.

11. Мечай А.А. Модифицирование низкообжигового белитового клинкера сульфоалюминатной добавкой на стадии гидратации / Разработка импортзамещающих технологий и материалов в химико-лесном комплексе: Сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27-28 окт. 1997 / Белор. гос. технол. университет. -Минск, 1997.-С. 155-157.

12. Кузьменков М.И., Куницкая Т.С., Мечай А.А. Перевод традиционной технологии портландцемента на получение быстротвердеющего белитового цемента // Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии: Тез. докл. 3 науч.-техн. конф., Гродно, 25-26 июня. 1998 / Гродн. гос. университет им. Я. Купалы -Гродно, 1998.-С. 135.

13. Кузьменков М.И., Мечай А.А. Белитовый цемент - перспективное малоэнергоёмкое вяжущее // Пути энергосбережения при производстве строительных материалов и конструкций: Тез. докл. и сообщ. науч.-техн. семинара, Минск, 27 июня 1998 г. / ГП НИИСМ -Минск, 1998.-С. 51-52.

14. Малоэнергоёмкие смешанные цементы / М.И.Кузьменков, Т.С.Куницкая, А.А.Мечай, А.С.Карнацевич, А.А.Сакович // Создание новых конкурентноспособных ресурсо- и энергосберегающих технологий производства материалов и конструкций: Тез. докл. науч.-техн. семинара, Минск, 28 июня 1998 / ГП «БелГИПРОСТРОМ».-Минск, 1998.-С. 43-44.

РЭЗЮМЭ

МЯЧАЙ АЛЯКСАНДР АНАТОЛЬЕВІЧ

АТРЫМАННЕ ВЫСОКААКТЫЎНАГА БЕЛІТАВАГА ЦЭМЕНТУ МАДЫФІКАВАННЕМ ЯГО СУЛЬФААЛЮМАСІЛКАТНАЙ ДАБАЎКАЙ

БЕЛІТАВЫ КЛІНКЕР, ФАСФАГІПС, КРЭЙДА, ГЛІНА, ДАМЕІЎКІ, СУЛЬФААЛЮМАСІЛКАТНАЯ ДАБАЎКА, ЦЭМЕНТ, ГІДРАТАЦЫЯ, ТАБЕРМАРЫТ, ГІДРАСУЛЬФАСІЛКАТ КАЛЬЦЫЮ, ТРЫВАЛАСЦЬ, ТЭХНАЛОГІЯ.

Аб'ект даследавання - белітавы цемент, мадыфікаваны сульфоалюмасілікатнай дабаўкай.

Мэта работы - атрыманне высокаактыўнага белітавага цэменту шляхам яго мадыфікавання сульфоалюмасілікатнай дабаўкай на аснове фасфагіпсу, крэйды і нізка- і сярэднеалюмінатных глін рознага складу.

Сістэматызаваны даныя па выкарыстанню алюмасілікатнай сыравіны рознага мінералагічнага складу для атрымання белітавых клінкераў

павышанай гідраўлічнай актыўнасці. Распрацаваны прынцыпы кравання мінералагічным складамсульфаалюмосілікатнай дабўкі на аснове фасфагіпсу, крэйды і глін рознага хімічнага складу. Вывучаны механізм утварэння Fe_2O_3 , TiO_2 , K_2O і Na_2O на фазавы склад САСД і устаноўлена вэ негатывнае ўздзеянне на працэс утварэннясульфаалюмінату ісульфасілікату кальцыю. Паказана, што выкарыстанне фасфагіпсу дазваляе зменшыць тэмпературу ўтварэння неабходнай мінералагічнай асновы на 150-200°C

Устаноўлена, што ў белітавым цэментным камні ў прысутнасці САСД змяняюцца ўмовы фарміравання, структура і склад прадуктў гідратацыі ў бок павелічэння колькасці добра закрышталізаваных нізкаасноуных гідрасілікатаў кальцыю з рознай будовай крышталей тыпу іраліту, афвіліту, $CSH(V)$, утварэнню якіх садзейнічае прысутнасць этрынгіту і гідрасульфасілікату кальцыю, якія выконваюць ролю цэнтраў крышталізацыі, што прыводзіць да павелічэння інтэнсіўнасці дыфузіі вады да непарэагаваўшай паверхні і паскарэння працэсу гідратацыі белітавай фазы.

Распрацаваны тэхналагічны працэс і праведзены прамысловыя выпрабаванні тэхналогіі атрымання САСД, паўпрамысловыя выпрабаванні тэхналогіі атрымання белітавага клінкеру, а таксама вывучаны фізіка-механічныя ўласцівасці актываванага белітавага цэменту. Паказана эканамічная эфектыўнасць вытворчасці распрацаванага цэменту і зборнага бетону і жалезабетону на яго аснове.

РЕЗЮМЕ

МЕЧАЙ АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОАКТИВНОГО БЕЛИТОВОГО ЦЕМЕНТА МОДИФИЦИРОВАНИЕМ ЕГО СУЛЬФОАЛЮМОСИЛИКАТНОЙ ДОБАВКОЙ

БЕЛИТОВЫЙ КЛИНКЕР, ФОСФОГИПС, МЕЛ, ГЛИНА, ПРИМЕСИ, СУЛЬФОАЛЮМОСИЛИКАТНАЯ ДОБАВКА, ЦЕМЕНТ, ГИДРАТАЦИЯ, ТОБЕРМОРИТ, ГИДРОСУЛЬФОСИЛИКАТ КАЛЬЦИЯ, ПРОЧНОСТЬ, ТЕХНОЛОГИЯ.

Объект исследования - белитовый цемент, модифицированный сульфоалюмосиликатной добавкой.

Цель работы - получение высокоактивного белитового цемента путем его модифицирования сульфоалюмосиликатной добавкой на основе

фосфогипса, мела и низко- и среднеалюминатных глин различного состава.

Систематизированы данные по применению алюмосиликатного сырья различного минералогического состава для получения белитовых клинкеров повышенной гидравлической активности. Разработаны принципы управления минералогическим составом сульфоалюмосиликатной добавки на основе фосфогипса, мела и глин различного химического состава. Изучен механизм влияния Fe_2O_3 , TiO_2 , K_2O и Na_2O на фазовый состав САСД и установлено их негативное воздействие на процесс образования сульфоалюмината и сульфосиликата кальция. Показано, что использование фосфогипса позволяет снизить температуру образования необходимой минералогической основы на 150-200°C.

Установлено, что в белитовом цементном камне в присутствии САСД изменяются условия формирования, структура и состав продуктов гидратации в сторону увеличения количества хорошо закристаллизованных низкоосновных гидросиликатов кальция с различным строением кристаллов типа пиролита, афвиллита, CSH(B), образованию которых способствует присутствие этtringита и гидросульфосиликата кальция, выполняющих роль центров кристаллизации, что приводит к увеличению интенсивности диффузии воды к непрореагировавшей поверхности и ускорению процесса гидратации белитовой фазы.

Разработан технологический процесс и проведены успешные промышленные испытания технологии получения САСД, полупромышленные испытания технологии получения белитового клинкера, а также изучены физико-механические свойства активированного белитового цемента. Показана экономическая эффективность производства разработанного цемента и сборного бетона и железобетона на его основе.

SUMMARY

MECHAI ALEXANDER ANATOLYEVICH

OBTAINING THE HIGHLY-ACTIVE BELITE CEMENT MODIFYING IT BY SULPHURALUMOSILICATE ADDITIVE

BELITE CLINKER, PHOSPHOGYPSUM, CHALK, CLAY, ADMIXTURES, SULPHURALUMOSILICATE ADDITIVE, CEMENT, HYDRATION, TOBERMORITE, CALCIUM HYDROSULPHURSILICATE, STRENGTH, TECHNOLOGY.

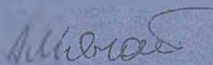
The subject of the investigation is belite cement, modified by sulphuralumosilicate additive.

The aim of the work is obtaining the highly-active belite cement by modifying it sulphuralumosilicate additive based on phosphogypsum, chalk and low- and mediumaluminat clays of different compositions.

The data on application of alumosilicate raw material of different mineralogical composition to obtain belite clinkers of higher hydraulic activity have been systematized. It has been worked out the principles of managing of mineralogical composition of sulphuralumosilicate additive based on phosphogypsum, chalk and low- and mediumaluminat clays of different chemical composition. It has been studied the influence mechanism of Fe_2O_3 , TiO_2 , K_2O and Na_2O on phase composition of SASA and it has been determined their negative influence on the process of calciumsulphuraluminate and calciumsulphursilicate formation. It has been shown that the use formation of necessary mineralogical base for 150-200°C.

It has been set up that in the belite cement stone in the presence of SASA there take place some changes of formation conditions, structure and the composition of hydration products. These changes are displayed with the increase of the quality of well-crystallized low-based calcium hydrosilicates with different crystal structures like hyrolite, atwillite, CSH(B). The presence of atringite and hydrocalciumpulphursilicate which act as crystallization centres, contributes to crystal formation. It leads to the increasing intensity of water diffusion to the unreacted surface and to the acceleration of the hydration process of the belite phase.

It has been worked out the technological process and the successful industrial tests of the technology obtaining SASA and semi-industrial tests of belite clinker obtaining. It has also been studied physico-mechanical properties of activated belite cement. It has been shown the economic effectiveness of the production of the cement, that has been worked out, as well as precast concrete, ferroconcrete on its base.



Мечай Александр Анатольевич

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОАКТИВНОГО БЕЛИТОВОГО ЦЕМЕНТА
МОДИФИЦИРОВАНИЕМ ЕГО СУЛЬФОАЛЮМОСИЛИКАТНОЙ
ДОБАВКОЙ

Подписано в печать 15.12.98. Формат, 60x84 1/16. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Усл. кр.-отт. 1,5. Уч.-изд. л. 1,3.

Тираж 70 экз. Заказ 516.

Белорусский государственный технологический университет
220050, Минск, Свердлова, 13а.

Отпечатано на ротاپринте Белорусского государственного
технологического университета.
220050, Минск, Свердлова, 13.