

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Факультет

Кафедра

промышленных технологий,
электроэнергетики и транспорта
(наименование)

Сварочное, литейное производство
и материаловедение
(наименование)

Направление подготовки

22.03.01 «Материаловедение и
технология материалов»

(код и наименование)

Профиль

«Материаловедение и технология новых
материалов»
(наименование)

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему

«Изучение технологических параметров ячеистых жаростойких
материалов на фосфатном связующем»

Студент

[подпись] 21.06.25
(подпись, дата)

Толубай уулу Нурсултан
(ф.и.о. полностью)

Научный руководитель
к.т.н., доцент

[подпись] 21.06.25
(подпись, дата)

Крюков Д.Б.
(фамилия, инициалы)

Нормоконтролёр
к.т.н., доцент

[подпись] 23.06.25
(подпись, дата)

Хорин А.В.
(фамилия, инициалы)

Работа допущена к защите (протокол заседания кафедры от 24.12.2024 № 6)

Заведующий кафедрой

[подпись] 23.06.25
(подпись, дата)

Розен А.Е.
(фамилия, инициалы)

Работа защищена с отметкой хорошо (протокол заседания ГЭК от 24.06.2025 № 8)

Секретарь ГЭК
к.т.н., доцент

[подпись] 24.06.2025
(подпись, дата)

Гуськов М.С.
(фамилия, инициалы)

ФГБОУ ВО «ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
Факультет промышленных технологий, электроэнергетики и транспорта
Кафедра «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

«Утверждаю»

Заведующий кафедрой СЛПТиМ
д.т.н., профессор А. Е. Розен

подпись
«28» января 2022 г.

ЗАДАНИЕ
на выпускную квалификационную работу

Студента гр. 21МТ1 Факультет промышленных технологий, электроэнергетики и транспорта Политехнического института ПГУ, очной формы обучения по направлению подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»

Толубай Улу Нурсултан

Научный руководитель работы: к.т.н., доцент Крюков Д.Б.

Время выполнения ВКР: с 03.02.25 г. по 03.07.2025 г.

Место преддипломной практики: кафедра «Сварочное, литейное производство и материаловедение» ПГУ

Тема работы: Изучение технологических параметров ячеистых жаростойких материалов на фосфатном связующем

Тема утверждена приказом ректора ПГУ № 1386/О от 28.12.24 г.

Объём и содержание основной части работы

Пояснительная записка (перечень вопросов, подлежащих разработке, расчетов, обоснований, описаний):

- введение с обоснованием актуальности темы исследования, установления объекта и предмета, постановкой цели и задач исследования;
- литературный обзор материалов на фосфатном связующем: классификация жаростойких материалов, технология жаростойких материалов на фосфатном связующем, виды и характеристика фосфатных связующих;
- выбор исходных материалов и методов проведения исследований;
- исследование реакции взаимодействия дисперсного алюминия с фосфатным связующим;
- исследование влияния огнеупорных наполнителей на свойства жаростойкого ячеистого материала;
- заключение – выводы и обоснования по теме работы и полученным результатам.

Графическая часть бакалаврской работы (перечень и содержание плакатов)

- цели и задачи исследования
- актуальность работы

1 слайд;

1 слайд;

- классификация жаростойких материалов 1 слайд;
- анализ видов фосфатных связующих 1 слайд;
- схема получения жаростойкого композиционного материала 1 слайд;
- выбор исходных материалов 3 слайда;
- оборудование для исследований 2 слайда;
- исследование влияния различных газообразователей и связующих на протекание экзотермической реакции 3 слайда;
- исследование влияния огнеупорных наполнителей на свойства жаростойкого фосфатного материала 2 слайда;
- основные выводы 1 слайд.

Рекомендуемая литература:

1. Красный Б. Л. Огнеупорные и строительные материалы на основе фосфатных связующих [текст] / Красный Б. Л. // Дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.11 : Москва, 2003 422 с.
2. Магилат, В. А. Жаростойкий газобетон на основе алюмоборфосфатного связующего и высокоглиноземистых отходов нефтехимии [Текст]: дис... канд. тех. наук: 05.23.05: защищена 22.04.2002: утв. 03.12.2002 / Магилат Владимир Александрович. – Уфа, 2002. – 136 с
3. Батрашов, В. М. Жаростойкий поризованный бетон повышенной термостойкости на основе модифицированного бором алюмофосфатного связующего и техногенных отходов [Текст]: дис... на соискание уч. ст. канд.техн. наук: 05.23.05: защищена 19.12.2013: утв. 13.05.2014 / В.М. Батрашов –Пенза, 2013. – 159 с.

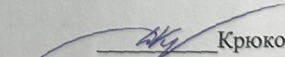
Руководитель ВКР:

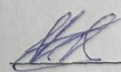
к.т.н., доцент

Задание к исполнению принял студент

гр. 21МТ1

03 февраля 2025 г.

 Крюков Д.Б.

 Толубай Н.

Выпускную квалификационную работу к защите допустить

Декан факультета промышленных технологий, электроэнергетики и транспорта
Политехнического института ПИУ

ОПОП освоена в полном объеме.
К государственной аттестации допустить

С.Ю. Киреев

ФГБОУ ВО «ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ФАКУЛЬТЕТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ
И ТРАНСПОРТА
кафедра «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

«Утверждаю»

Руководитель ВКР

к.т.н., доцент каф. «СПиМ» Крюков Д.Б.

подпись

« 03 » 02 2025 г.

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

на выпускную квалификационную работу

Студенту гр. 21MT1 Факультета промышленных технологий, электроэнергетики и транспорта Политехнического института ПГУ, очной формы обучения по направлению подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технология материалов»

Толубай Уулу Нурсултан

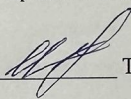
Тема работы: Изучение технологических параметров ячеистых жаростойких материалов на фосфатном связующем

Наименование этапа работы	Срок исполнения		Отметка о выполнении
	Начало	окончание	
1. Получение задания, его уяснение, беседа с руководителем. Подготовка к выполнению ВКР.	03.02.25	10.02.25	Выполнено Д.Б.К.
2. Подбор и изучение рекомендованной литературы.	10.02.25	10.03.25	Выполнено Д.Б.К.
3. Изучение объекта исследования, постановка цели и задачи работы. Написание введения.	11.03.25	25.03.25	Выполнено Д.Б.К.
4. Проведение литературно обзора. Выбор основных нормативно-технических документов.	26.03.25	09.04.25	Выполнено Д.Б.К.
5. Выбор исходных материалов и методов проведения исследований	10.04.25	23.04.25	Выполнено Д.Б.К.
6. исследование влияния огнеупорных наполнителей на свойства жаростойкого фосфатного материала	24.04.25	23.05.25	Выполнено Д.Б.К.
7. Завершение оформления пояснительной записки, таблиц и рисунков.	04.06.25	05.06.25	Выполнено Д.Б.К.
8. Представление завершенной ВКР	06.06.25	10.06.25	Выполнено Д.Б.К.

нормоконтролеру			
9. Представление ВКР руководителю на просмотр и проверку на плагиат.	11.06.25	17.06.25	Выполнено НВ
10. Предварительная защита ВКР	18.06.25	19.06.25	Выполнено НВ
11. Полное завершение всех работ и представление зав. кафедрой на подпись пояснительной записки (совместно с графической частью, протоколом проверки на плагиат и отзывом руководителя)	12.06.25	17.06.25	Выполнено НВ
12. Защита выпускной квалификационной работы	19.06.25	03.07.22	Выполнено НВ

Прохождение каждого этапа подготовки ВКР подтверждается подписью руководителя.

Студент учебной группы 21MT1



Толубай Н.

"03" 02 2025 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФГБОУ ВО «ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
Кафедра «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

ОТЗЫВ

**РУКОВОДИТЕЛЯ О ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
БАКАЛАВРА**

Студент: Толубай Уулу Нурсултан

Тема: Изучение технологических параметров ячеистых жаростойких материалов на фосфатном связующем

Направление подготовки – 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов», группа 21MT1.

Выпускная квалификационная работа содержит 63 с., 14 рис., 3 табл., 43 использованных источников. Графическая часть из 17 слайдов.

Целью работы является: Исследование технологических параметров ячеистых жаростойких материалов на фосфатном связующем.

К задачам выпускной квалификационной работы относятся:

- Изучить классификацию жаростойких материалов и технологию их производства.
- Выбрать исходные материалы и оборудование, необходимых для проведения исследований.
- Исследовать взаимодействие порошка алюминия и фосфатного связующего.
- Исследовать влияние огнеупорных наполнителей на получаемый материал.

Структура работы состоит из введения, 3 глав и заключения. Введение раскрывает актуальность работы, объект и предмет исследования, поставленные цели и задачи, предполагаемый результат, методы исследования и краткое описание структуры работы. В первой главе предоставлена

классификация жаростойких материалов, виды фосфатных связующих, а также рассмотрены варианты жаростойких материалов на фосфатном связующем. Во второй главе, обоснован выбор материалов и методы проведения исследований этих материалов. В третьей главе представлены результаты проведенных исследований, в частности исследование времени начала интенсивного взаимодействия и максимальная температура реакции между различными фосфатными связующими и различными порошками алюминия. Кроме этого проведено исследование влияния огнеупорных наполнителей на свойства жаростойкого ячеистого материала.

Толубай Уулу Нурсултан относится к числу дисциплинированных студентов, умеющих планировать время выполнения работы и способных самостоятельно принимать рациональные инженерные решения.

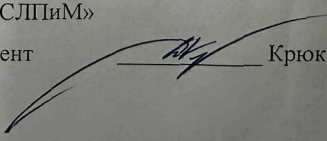
За время выполнения выпускной квалификационной работы Толубай Уулу Нурсултан показал себя технически грамотным студентом, обладающим современными методами решения профессиональных задач.

Выполненная работа соответствует требованиям, предъявляемым к выпускным квалификационным работам.

Считаю, что выпускная квалификационная работа может быть допущена к защите в ГЭК, а ее автор Толубай Уулу Нурсултан заслуживает присвоение квалификации бакалавра по направлению подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов».

Отзыв составил доцент каф. «СЛПИМ»

ФГБОУ ВО «ПГУ» к.т.н., доцент



Крюков Д.Б.

Ректору Пензенского государственного
университета
А. Д. Гулякову
от студента 4 курса ФПТЭТ очной
формы обучения

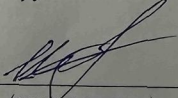
Толубай Уулу Нурсултан
(фамилия, имя, отчество)

ЗАЯВЛЕНИЕ

Я, Толубай Уулу Нурсултан, студент 4 курса очной формы обучения направления подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технология материалов», бакалаврская программа «Материаловедение и технология новых материалов», прошу провести проверку с использованием системы «Антиплагиат» выпускной квалификационной работы на тему: *«Изучение технологических параметров ячеистых жаростойких материалов на фосфатном связующем»*, выполненной мной самостоятельно, на содержание элементов плагиата.

Все прямые заимствования из печатных и электронных источников, а также из защищенных ранее выпускных квалификационных работ, кандидатских и докторских диссертаций имеют соответствующие ссылки.

Я ознакомлен с действующим Стандартом университета «Выпускная квалификационная работа обучающихся по образовательным программам высшего образования – программам бакалавриата, программам специалитета и программам магистратуры», согласно которому обнаружение плагиата является основанием для недопуска ВКР к защите.


(подпись студента)

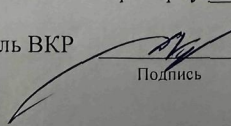
09.06.2025

(дата)

ВКР представлена на проверку 10.06.2025

(дата)

Руководитель ВКР


Подпись

Крюков Д. Б.
И.О.Фамилия

СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Пензенский государственный
университет"

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Толубай Уулу Нурсултан
Самоцитирование
рассчитано для: Толубай Уулу Нурсултан
Название работы: ВКР
Тип работы: Выпускная квалификационная работа
Подразделение: каф. "Сварочное, литейное производство и материаловедение"

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ: НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

СОВПАДАНИЯ	24.6%	СОВПАДАНИЯ	24.6%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	75.4%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	75.4%
ЦИТИРОВАНИЯ	0%	ЦИТИРОВАНИЯ	0%
САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 09.06.2025

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 09.06.2025 10:17

Структура документа: Проверенные разделы: основная часть с.1-3, 34-58, содержание с.4, введение с.5-34, выводы с.59-60
Модули поиска: СМИ России и СНГ; Переводные заимствования; Шаблонные фразы; ИПС Адилет, СПС ГАРАНТ: аналитика; Медицина; Публикации eLIBRARY; IEEE; Цитирование; Коллекция НБУ; Патенты СССР, РФ, СНГ; Диссертации НББ; Кольцо вузов; Сводная коллекция ЭБС; Перефразирования по коллекции IEEE; Публикации РГБ; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Переводные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Переводные заимствования IEEE; Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; Публикации eLIBRARY (переводы и перефразирования); Ко...

Работу проверил: Крюков Д.Б.

ФИО проверяющего

Дата подписи:

02.07.2025

Подпись проверяющего



Чтобы убедиться
в подлинности справки, используйте QR-код,
который содержит ссылку на отчет

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование
корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего.
Предоставленная информация не подлежит использованию
в коммерческих целях

Аннотация

Выпускная квалификационная работа содержит 63 страницы, 3 таблицы, 1 рисунок, 43 использованных источника.

ФОСФАТНОЕ СВЯЗУЮЩЕЕ, ЯЧЕИСТЫЕ ЖАРОСТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ, ТЕРМОСТОЙКОСТЬ, АЛЮМИНИЕВЫЙ ПОРОШОК, КРЕМНЕГРАФИТОВЫЕ ОТХОДЫ

Объектом исследования являются ячеистые жаростойкие материалы на основе алюмофосфатных (АФС), алюмоборфосфатных (АБФС) и ортофосфорной кислоты (ОФК) систем.

Предмет исследования. Свойства, состав и технологии получения жаростойких материалов на фосфатных связующих.

Область применения. Металлургия, строительство, авиакосмическая промышленность, энергетика и другие отрасли, где требуются материалы с высокой термостойкостью и низкой теплопроводностью.

Цель работы. Исследование технологических параметров ячеистых жаростойких материалов на фосфатном связующем.

Структура работы состоит из введения, 3 глав и заключения. Введение раскрывает актуальность работы, объект и предмет исследования, поставленные цели и задачи, предполагаемый результат, методы исследования и краткое описание структуры работы. В первой главе предоставлена классификация жаростойких материалов, виды фосфатных связующих, а также рассмотрены варианты жаростойких материалов на фосфатном связующем. Во второй главе, обоснован выбор материалов и методы проведения исследований этих материалов. В третьей главе представлены результаты проведенных исследований.

Процесс исследования в данной выпускной квалификационной работе проводился следующими теоретическими методами: анализ технической литературы, анализ нормативно-правовой документации по теме работы, обобщение полученной информации, а также эмпирическими методами: микроструктурный анализ и исследование коррозионной стойкости композиционного материала

При написании выпускной квалификационной работы была использована учебная и периодическая литературы, статьи из научно–практических изданий, результаты научных исследований кафедры «Сварочное, литейное производство и материаловедение» Пензенского государственного университета, в том числе в рамках грантов министерства образования Российской Федерации и Российского научного фонда, различные интернет – ресурсы.

Содержание

Введение.....	5
1 Ячеистые жаростойкие материалы на фосфатном связующем.....	8
1.1 Классификация жаростойких материалов	10
1.2 Технология ячеистых жаростойких материалов на фосфатном связующем 12	
1.3 Виды и характеристики фосфатных связующих.....	15
2 Исходные материалы и методы проведения исследований	23
2.1 Исходные материалы.....	23
2.2 Методы проведения исследований	38
3 Исследование влияния технологических параметров жаростойкого ячеистого материала на его свойства.....	48
3.1 Исследование реакции взаимодействия алюминиевого порошка и фосфатного связующего	49
3.2 Исследование влияния огнеупорных наполнителей на свойства жаростойкого ячеистого материала.....	56
Заключение	61
Список литературы	63
Приложение	68

Введение

В последние десять лет в материаловедении оформилось новое направление, связанное с разработкой и производством материалов на основе фосфатных связующих. Эти материалы находят всё более широкое применение в различных отраслях народного хозяйства благодаря активным исследованиям в области создания фосфатных вяжущих и огнеупоров на их основе. В отличие от других видов связующих, именно фосфатные обеспечивают огнеупорам исключительные эксплуатационные характеристики: устойчивость к высоким температурам, термостойкость и стабильность размеров в процессе использования. Кроме того, включение фосфорсодержащих соединений в состав огнеупорных масс в качестве затворяющей жидкости позволяет исключить этап обжига при производстве, поскольку формирование прочной огнеупорной матрицы, придающей изделиям необходимые физико-технические свойства, происходит при относительно низких температурах [1].

Сегодня в промышленных масштабах производятся плотные, лёгкие и ячеистые фосфатные материалы, огнеупорные клеящие растворы и лёгкие гранулированные заполнители. Хотя природа фосфатных материалов, процессы их формирования и технологические особенности уже изучены в ряде публикаций, многие аспекты остаются недостаточно исследованными.

К фосфатным материалам относят те, что содержат любое количество специально введённых фосфорных соединений различного химического состава и агрегатного состояния. Чаще всего в качестве фосфорсодержащего компонента используют ортофосфорную кислоту или металлофосфатные растворы (фосфатные связующие), реже – соли ортофосфорной кислоты. Применяются как промышленные продукты, так и фосфорсодержащие отходы [2].

Фосфор занимает особое место среди элементов, способных образовывать связующие для огнеупорных материалов. Только фосфатные соединения при высокотемпературной дегидратации могут формировать огнеупорные структуры с

различными наполнителями: оксидами, силикатами, алюмосиликатами и даже растительными полимерами. Благодаря уникальным свойствам фосфорных кислот и фосфатов их широко применяют в технике для создания огнеупорных растворов, материалов и покрытий для тепловых агрегатов и строительных конструкций. На сегодняшний день накоплены обширные данные о физических, химических, теплофизических и других свойствах фосфорных соединений, а также разработано множество материалов на основе фосфатных связующих (таких как фосфорная кислота, алюмофосфатное связующее АФС, алюмоборфосфатное связующее АБФС и др.).

Особое внимание в последнее время уделяется разработке ячеистых жаростойких материалов на основе фосфатных связующих, которые сочетают в себе преимущества пористой структуры — низкую плотность (300–1200 кг/м³), высокую теплоизоляционную способность и устойчивость к циклическим термонагрузкам — с уникальными свойствами фосфатной матрицы, обеспечивающей прочное армирование структуры даже при температурах эксплуатации до 1600–1800 °С. Такие материалы позволяют отказаться от традиционно энергоемких этапов термообработки, что делает их производство более экономичным и экологичным.

Исследования в области фосфатных композитов показали перспективность использования модифицированных связующих систем, таких как алюмоборфосфатные (АБФС), алюмофосфатные (АФС) и ортофосфорная кислота (ОФК), в комбинации с различными наполнителями — шамотный порошок, микрокремнезем, перлит, вермикулит, керамические микросферы, а также вторичными ресурсами, такими как кремнеграфитовые отходы и металлургические шлаки. Введение газообразующих добавок, таких как алюминиевый порошок (ПАП-1, ПОС-15), позволяет формировать равномерную ячеистую структуру, обеспечивая контролируемую пористость (то 55 до 85%) и прочность (от 5 до 15 МПа).

Применение в качестве основы фосфатных связующих (вместо чистой ортофосфорной кислоты) позволяет значительно снизить реакционную способность системы «связующее-алюминий», что упрощает технологический процесс и

повышает стабильность получаемого материала. Это открывает возможность для изготовления изделий сложной формы без специального оборудования и дополнительного нагрева. Более того, использование промышленных отходов, таких как кремнеграфитовые материалы, позволяет не только повысить термостойкость конечного продукта, но и решить важные задачи утилизации и снижения себестоимости производства.

Экологическая безопасность алюмофосфатных и алюмоборфосфатных связующих делает их предпочтительными по сравнению с традиционными формальдегидными смолами. Они не выделяют токсичных летучих веществ при нагревании, что особенно важно для строительных и теплоизоляционных материалов. Кроме того, данные связующие обладают антипиренными свойствами, замедляя распространение огня и снижая риск возгорания.

Области применения ячеистых жаростойких материалов на фосфатных связующих чрезвычайно разнообразны: это теплоизоляция промышленных печей, футеровка высокотемпературных агрегатов, создание огнезащитных конструкций в строительстве, а также применение в авиационной и космической технике в качестве легких огнеупорных блоков для теплозащитных систем. Особенно востребованы эти материалы в случаях, когда требуется сочетание низкой теплопроводности, высокой термостойкости и минимального веса.

1 Ячеистые жаростойкие материалы на фосфатном связующем

Современные требования к теплоизоляционным и конструкционным материалам для высокотемпературных применений обусловили активное развитие ячеистых жаростойких материалов на фосфатных связующих. Эти материалы представляют собой уникальный класс композитов, сочетающих легкую ячеистую структуру с исключительной термической стабильностью, что делает их незаменимыми для работы в экстремальных температурных условиях. В основе их создания лежит использование фосфатных связующих систем, которые в сочетании с жаростойкими наполнителями и специальными порообразующими добавками позволяют получать материалы с контролируемой пористостью и выдающимися эксплуатационными характеристиками.

Основу таких материалов составляют фосфатные связующие, преимущественно на основе ортофосфорной кислоты и ее производных - алюмофосфатных, хромофосфатных и других металлофосфатных соединений. Эти системы обладают рядом уникальных свойств, отличающих их от традиционных неорганических вяжущих. В частности, они способны формировать прочные связи с минеральными наполнителями при относительно низких температурах (от 20 до 300 °С), не требуя высокотемпературного обжига, что существенно снижает энергозатраты при производстве. Процесс структурообразования в таких системах основан на сложных кислотно-основных взаимодействиях между компонентами, приводящих к образованию термически стабильных фосфатных структур [1].

Ячеистая структура материала формируется за счет введения специальных газообразующих или пенообразующих добавок, создающих систему замкнутых пор по всему объему материала. В сочетании с легкими жаростойкими наполнителями, такими как вспученный вермикулит, перлит или керамические микросферы, это позволяет получать материалы с плотностью от 300 до 1200 кг/м³. При этом, несмотря на высокую пористость, достигающую от 85 до 90%, такие материалы

сохраняют достаточную механическую прочность благодаря особенностям фосфатной матрицы, эффективно армирующей пористую структуру.

Ключевыми преимуществами ячеистых жаростойких материалов на фосфатных связующих являются их исключительная термическая стабильность (от 1600 до 1800 °С для составов с оксидом циркония), низкая теплопроводность (от 0,1 до 0,5 Вт/(м·К)) и высокая устойчивость к термоударам. Эти характеристики определяются как свойствами фосфатной матрицы, так и особенностями ячеистой структуры, обеспечивающей эффективную теплоизоляцию. Важно отметить, что такие материалы демонстрируют минимальную усадку при высокотемпературной эксплуатации, что связано с особенностями фазовых превращений в фосфатных системах при нагреве.

Технологические аспекты производства этих материалов включают возможность использования различных методов формования (литье, прессование, напыление), а также вариативность в выборе сырьевых компонентов. Особый интерес представляет применение промышленных отходов - металлургических шлаков, золы ТЭС и других вторичных ресурсов в качестве наполнителей, что не только снижает себестоимость, но и решает экологические проблемы утилизации отходов [1].

Области применения ячеистых жаростойких материалов на фосфатных связующих чрезвычайно разнообразны. Они используются для теплоизоляции промышленных печей в металлургии и стекольной промышленности, футеровки высокотемпературных агрегатов, создания огнезащитных конструкций в строительстве. Особенно востребованы эти материалы в случаях, когда требуется сочетание легкого веса, высокой теплоизоляционной способности и устойчивости к экстремальным температурам.

Перспективы развития этого класса материалов связаны с совершенствованием их структуры на микро- и макроуровне, разработкой составов с программируемыми свойствами, а также созданием многофункциональных материалов, сочетающих жаростойкость с другими полезными характеристиками (например,

радиационной стойкостью или химической инертностью). Особое внимание уделяется разработке умных материалов, способных адаптировать свою структуру и свойства в ответ на температурные воздействия, что открывает новые возможности для их применения в передовых высокотемпературных технологиях.

1.1 Классификация жаростойких материалов

Развитие различных отраслей промышленности, включая машиностроение, металлургию, химическую и нефтеперерабатывающую промышленность, а также новые технологические направления, напрямую зависит от увеличения объемов выпуска и повышения качества материалов, способных выдерживать экстремально высокие температуры. Производство композиционных жаростойких материалов играет ключевую роль в экономике страны, способствуя техническому прогрессу и ускоренному развитию промышленности и народного хозяйства. Однако даже текущие объемы производства не покрывают растущие потребности, что сдерживает внедрение новых технологий и повышение эффективности производства.

Жаростойкие материалы классифицируются по нескольким признакам. По химико-минералогическому составу они делятся на кремнеземистые (динасовые с содержанием SiO_2 не менее 92 %), алюмосиликатные (шамотн), магнезиальные (магнезитовые, доломитовые, форстеритовые, шпинельные), хромистые (хромитовые и хромомagneзитовые), углеродистые (графитовые, коксовые), цирконистые (циркониевые и цирконовые), окисные (из оксидов бериллия, тория, церия), а также карбидные и нитридные (карборундовые, нитридные, карбидные, сульфидные) [2-3].

По степени огнеупорности материалы подразделяются на три группы: огнеупорные (от 1580 до 1750 °C), высокоогнеупорные (от 1770 до 2000 °C) и высшей огнеупорности (свыше 2000 °C). Согласно ГОСТ 4385-68 [4], они также делятся на классы: 0 (не менее 1750 °C), А (не менее 1730 °C), Б (не менее 1670 °C) и В (не менее 1580 °C).

По способу термической обработки жаростойкие изделия бывают обжиговыми, безобжиговыми и литыми плавленными. По методу изготовления различают формованные (готовые изделия), неформованные (набивные массы, обмазки) и огнеупорные растворы (для заполнения швов кладки). По форме и размерам выделяют нормальный кирпич, фасонные изделия, крупные блоки и специальные конструкции (тигли, трубы и др.).

В последние годы вместо штучных огнеупоров все чаще применяются жаростойкие составы, включая фосфатные материалы, которые могут заменить более 50% традиционных изделий. Их преимущества — отсутствие необходимости предварительного обжига, что снижает энергозатраты, и более низкая стоимость по сравнению с классическими огнеупорами.

Важным сырьем для жаростойких материалов являются отходы металлургии: феррохромовые и силикомарганцевые шлаки, золошлаковые смеси, алюмотермические шлаки, отработанные катализаторы нефтехимии [2]. Особенно перспективно использование высокоглиноземистых цемента, получаемых из шлаков алюмотермического производства и отработанных катализаторов.

Одной из актуальных задач является разработка жаростойких фосфатных материалов на основе бесцементных вяжущих с использованием кремнегелевых и других кремнеземистых компонентов. Также важно применение вторичных ресурсов, таких как отходы огнеупорной промышленности, кремнеграфитовые тигли и асбестовые отходы.

Жаростойкие фосфатные материалы применяются в футеровках промышленных печей, полах горячих цехов, дверях коксовых печей, теплоизоляции туннельных и известково-обжигательных печей. Однако они имеют недостатки: чувствительность к условиям укладки, сушки и нагрева, повышенную усадку и сложности работы при низких температурах. Тем не менее, их преимущества, включая возможность создания более технологичных и теплоэффективных конструкций, компенсируют эти минусы [3].

Среди распространенных связующих для жаростойких материалов выделяют:

- Портландцемент (содержит силикаты и алюминаты кальция, максимальная рабочая температура — до 1600 °С при использовании высокоогнеупорных добавок).
- Жидкое стекло (требует добавок-отвердителей, таких как кремнефтористый натрий или шлаки).
- Коллоидные кремнеземистые связки (обладают высокой огнеупорностью и не вызывают коррозии).
- Фосфатные связки (образуются при реакции ортофосфорной кислоты с оксидами металлов).

Согласно ГОСТ 25485-2019 [4], жаростойкие материалы также классифицируются по плотности (теплоизоляционные, конструкционно-теплоизоляционные, конструкционные), прочности на сжатие (классы от В0,5 до В12,5) и морозостойкости (марки $F15$ – $F50$).

Таким образом, развитие жаростойких материалов направлено на повышение их эффективности, снижение себестоимости и расширение сфер применения в промышленности.

1.2 Технология ячеистых жаростойких материалов на фосфатном связующем

Ячеистые жаростойкие материалы на фосфатном связующем представляют собой современный класс высокотемпературных композитов, которые находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности благодаря уникальному сочетанию эксплуатационных характеристик. Эти материалы отличаются исключительной термостойкостью, достигающей 1600-1800 °С, при этом обладая низкой теплопроводностью (от 0,1 до 0,5 Вт/(м·К)) и значительно меньшей плотностью (от 0,3 до 1,2 г/см³) по сравнению с традиционными огнеупорами. Основной технологической особенностью их производства является создание

контролируемой пористой структуры, достигаемой за счет введения специальных газообразующих добавок или порообразователей в фосфатную матрицу.

Ключевыми компонентами таких композиционных материалов выступают несколько групп веществ. Основу составляет фосфатное связующее, в качестве которого чаще всего применяется ортофосфорная кислота (H_3PO_4) или ее производные, в частности алюмофосфатные составы. При взаимодействии с оксидами металлов (Al_2O_3 , MgO , ZrO_2) эти соединения образуют прочные термостойкие фосфатные комплексы, обеспечивающие структурную целостность материала при высокотемпературном воздействии [5]. Важнейшую роль играют огнеупорные заполнители - тонкодисперсные порошки шамота, корунда или магнезита, которые не только повышают механическую прочность композита, но и существенно увеличивают его термическую стабильность. Для формирования ячеистой структуры в состав вводятся специальные порообразующие добавки, такие как пероксид водорода, карбонаты или металлический алюминий, которые при нагреве разлагаются с выделением газообразных продуктов. Дополнительно могут использоваться различные модификаторы - керамические волокна, микросилика или золь-гель добавки, позволяющие оптимизировать структуру материала и минимизировать усадочные деформации при термообработке.

Технологический процесс производства ячеистых жаростойких материалов включает несколько последовательных стадий. На первом этапе осуществляется тщательное приготовление смеси, при котором фосфатное связующее, заполнители и порообразователи смешиваются до достижения абсолютной однородности состава. Далее следует формование, которое может осуществляться различными методами - от традиционной заливки в формы до более современных способов напыления. Особое значение имеет стадия газообразования и отверждения, когда при нагреве до температур от 80 до 200 °C происходит разложение порообразующих добавок с выделением газа и формированием равномерной пористой структуры по всему объему материала [6-7]. Завершающим этапом является высокотемпературная обработка при температуре от 800 до 1200 °C, в ходе которой происходит

окончательное спекание структуры и достижение максимальных прочностных характеристик.

Эксплуатационные преимущества ячеистых фосфатных материалов делают их чрезвычайно востребованными в различных областях промышленности. Благодаря высокой пористости (до 85 %) они обладают исключительно низкой плотностью при сохранении достаточной механической прочности. Выдающиеся теплоизоляционные свойства в сочетании с химической стойкостью к воздействию расплавов металлов и шлаков позволяют эффективно использовать эти материалы в качестве теплоизоляции промышленных печей, котлов и высокотемпературных трубопроводов. В строительной отрасли они находят применение в качестве огнезащитных панелей, а в авиационной и космической технике - как легкие огнеупорные блоки для теплозащитных систем.

Однако наряду с очевидными преимуществами, ячеистые жаростойкие материалы имеют и определенные ограничения. Основными проблемами остаются их относительная хрупкость при значительных механических нагрузках, а также высокая чувствительность к режимам сушки и нагрева, требующая строгого соблюдения технологических параметров [6]. Современные исследования в этой области направлены на разработку новых модифицированных составов. Перспективным направлением является введение нановолокон карбида кремния или оксида алюминия для существенного повышения прочностных характеристик. Большое внимание уделяется также использованию промышленных отходов - золы, шлаков и других вторичных ресурсов, что позволяет не только снизить себестоимость продукции, но и решить важные экологические задачи. Особый интерес представляют работы по созданию гибридных композитов с полимерными добавками, которые могли бы сочетать жаростойкость с повышенной эластичностью.

Таким образом, ячеистые жаростойкие материалы на фосфатной связке представляют собой перспективный класс высокотемпературных композитов, успешно сочетающих легкость, термостойкость и хорошие теплоизоляционные свойства. Их разработка и совершенствование открывают новые возможности для создания

эффективных теплозащитных систем в различных отраслях промышленности [8]. Дальнейшие исследования в этой области направлены на оптимизацию структуры материалов, расширение диапазона их эксплуатационных характеристик и разработку более экономичных и технологичных производственных процессов.

Рассмотрим технологический процесс производства ячеистых жаростойких материалов на основе алюмофосфатного связующего. Данный процесс представляет собой сложную многоступенчатую операцию, в основе которой лежит химическая реакция взаимодействия алюминия с ортофосфорной кислотой с последующим формированием пористой структуры материала. Ключевым аспектом технологии является образование термически устойчивых алюмофосфатных соединений ($\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ и AlPO_4), которые обеспечивают сохранение структурной целостности материала при экстремально высоких температурах до 1800 °C.

Производственный цикл начинается с подготовки связующего состава. На этом этапе осуществляется тщательное смешение ортофосфорной кислоты (с концентрацией 50-85%) с алюминиевым компонентом, который может быть представлен в виде порошка, гидроксида или оксида алюминия. Соотношение компонентов поддерживается на уровне $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{P}_2\text{O}_5 = 1:3$ в мольных долях. Процесс смешения проводится при температуре от 60 до 80 °C с постоянным механическим перемешиванием в течение от 2 до 4 часов до достижения полной гомогенизации раствора. Для улучшения термических характеристик конечного продукта на этой стадии могут вводиться модифицирующие добавки, такие как оксиды хрома (Cr_2O_3) или циркония (ZrO_2).

1.3 Виды и характеристики фосфатных связующих

Фосфатные связующие представляют собой важный класс неорганических вяжущих веществ, широко применяемых при производстве жаростойких и специальных материалов. Их основу составляют соединения фосфора, способные при взаимодействии с оксидами металлов образовывать прочные термостойкие структуры. В зависимости от химического состава и свойств фосфатные связующие

можно разделить на несколько основных групп, каждая из которых имеет свои особенности и области применения.

Одним из наиболее распространенных видов является ортофосфорная кислота (H_3PO_4), которая выступает в качестве базового компонента для многих фосфатных систем. Ее главное преимущество заключается в способности взаимодействовать с различными оксидами металлов, образуя устойчивые фосфатные соединения [9-11]. При этом процесс отверждения может протекать как при комнатной температуре, так и при нагреве, в зависимости от состава системы. Ортофосфорная кислота особенно эффективна при работе с оксидами алюминия, магния и циркония, образуя с ними прочные химические связи.

Алюмофосфатные связующие представляют собой еще одну важную группу, получаемую путем взаимодействия ортофосфорной кислоты с оксидом или гидроксидом алюминия. Такие системы отличаются повышенной термостойкостью и способны сохранять свои свойства при температурах до 1500-1600°C. Алюмофосфатные связующие характеризуются хорошей адгезией к различным огнеупорным материалам, что делает их востребованными при производстве жаростойких покрытий и композитов. Кроме того, они обладают устойчивостью к воздействию многих агрессивных сред, включая расплавы металлов и шлаков.

Магниево-фосфатные связующие образуются при реакции ортофосфорной кислоты с оксидом магния. Особенностью этих систем является быстрое твердение даже при низких температурах, что делает их удобными для использования в условиях, где требуется ускоренное формирование прочной структуры. Магниево-фосфатные композиции демонстрируют высокую механическую прочность и хорошую устойчивость к термическим нагрузкам, хотя их максимальная температура применения несколько ниже, чем у алюмофосфатных аналогов, и обычно не превышает от 1200 до 1400 °C.

Циркониево-фосфатные связующие относятся к наиболее термостойким системам, способным выдерживать температуры до 1800 °C и выше. Они образуются при взаимодействии фосфорной кислоты с оксидом циркония и характеризуются

исключительной химической стойкостью в агрессивных средах [12-14]. Такие связующие часто применяются в особо ответственных применениях, где требуются материалы с максимальной огнеупорностью и устойчивостью к коррозии. Однако их использование ограничивается относительно высокой стоимостью исходных компонентов.

Помимо перечисленных видов, существуют и более сложные многокомпонентные фосфатные системы, включающие, например, одновременно алюминий, магний и кремний. Такие связующие позволяют комбинировать преимущества различных фосфатных соединений и создавать материалы с заданными свойствами. Особый интерес представляют также модифицированные фосфатные связующие, в состав которых вводятся различные добавки для улучшения тех или иных характеристик. Например, введение соединений бора позволяет снизить температуру спекания, а добавка хромовых соединений повышает химическую стойкость.

Важной характеристикой фосфатных связующих является их способность к отверждению, которая может существенно варьироваться в зависимости от состава. Некоторые системы (например, магниевые-фосфатные) способны твердеть уже при комнатной температуре, тогда как другие (особенно на основе тугоплавких оксидов) требуют обязательного нагрева для завершения процессов структурообразования. Это свойство необходимо учитывать при выборе связующего для конкретного технологического процесса [14].

Еще одной ключевой особенностью фосфатных связующих является их поведение при высокотемпературном воздействии. В отличие от многих других типов вяжущих, они не плавятся, а подвергаются постепенной поликонденсации с образованием все более устойчивых структур. Это делает их особенно ценными для создания материалов, работающих в экстремальных температурных условиях. При этом следует учитывать, что при нагреве большинство фосфатных связующих претерпевают ряд фазовых превращений, которые могут сопровождаться изменением объема, поэтому важное значение имеет правильный подбор режимов термообработки.

Жидкие алюмофосфатные связующие (далее АФС), наиболее часто применяемые при производстве жаростойких фосфатных материалов. Они явились родоначальником получения большинства связующих, известных в настоящее время. Однозамещенное связующее типа $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ получают путем нейтрализации ОФК гидроксидом алюминия одним из следующих способов:

а) молотый $\text{Al}(\text{OH})_3$ смешивают с 60 % H_3PO_4 в требуемом соотношении растворения $\text{Al}(\text{OH})_3$, при этом связку не кипятят;

б) молотый $\text{Al}(\text{OH})_3$ смешивают с H_3PO_4 и нагревают в диапазоне температур от 60 до 80 °С около 1 часа, иногда кипятят от 8 до 10 мин;

в) с целью интенсификации реакции между $\text{Al}(\text{OH})_3$ и H_3PO_4 используют различные катализаторы. В результате конечным продуктом термических превращений данного связующего любого состава является ортофосфат алюминия – AlPO_4 , который обладает огнеупорностью выше 1800 °С. Главным преимуществом является высокая огнеупорность, но при этом они имеют высокую температуру отверждения а так же имеют ряд других недостатков, в результате появилась необходимость создавать новые виды связующих [15-18].

Высокой огнеупорностью обладает хромофосфатное связующее (далее ХФС). Применение таких связующих достаточно перспективно за счет возможности получения стабильных растворов с высокой степенью нейтрализации. В большинстве случаев хромофосфатное связующее получают взаимодействием хромового ангидрида Cr_2O_3 с 60 % ОФК при перемешивании.

При проведении литературного анализа было выявлено, что интенсивная кристаллизация наблюдается после 600 °С, при 800 °С при этом аморфной фазы остается мало. Продукты кристаллизации аморфной фазы при температурах от 900 до 1000 °С представляют собой метафосфат хрома и пирофосфат хрома. После обжига при температуре от 1300 до 1400 °С кристаллы возрастают в размерах, при этом взаимно прорастая. При возрастании температуры 1500 °С и выше наблюдается уменьшение количества пирофосфата хрома за счет его разложения до Cr_2O_3 и CrPO_4 . Кристаллический CrPO_4 существует до температуры 1800 °С, при котором

он плавится. В результате, материалы на основе хромфосфатных связующих обладают высокой огнеупорностью, тем самым практически не уступают АФС.

Магнийфосфатные связующие так же распространены в жаростойких материалах. Данные связующие получают путем затворения оксида магния ОФК или применяются в виде жидкой однозамещенной связки типа $\text{Mg}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$. Жидкие магнийфосфатные связующие (далее МФС) получают при взаимодействии ортофосфорной кислоты с магниевыми материалами: оксидом магния, гидроксидом магния, периклазовым цементом и каустическим магнезитом. Для получения МФС к 60 % ортофосфорной кислоте добавляют небольшими порциями один из вышеуказанных материалов. Реакция взаимодействия оксида магния и кислоты протекает с большим тепловыделением. Для того чтобы замедлить протекание реакции необходимо охладить смесь. Магнийфосфатную связку применяют при производстве шамотных, фосфоритовых и хромитовых жаростойких фосфатных материалов. Такое связующие обладает меньшей огнеупорностью, и имеет меньшую температуру применения по сравнению с АФС и ХФС [16].

Кальцийфосфатные связки применяются в виде водного раствора однозамещенного фосфата кальция, более известного как двойной суперфосфат. Для него относят: сравнительно низкая огнеупорность, ограниченная сфера применения, а также низкая активность из-за невозможности использования связующих со степенями замещения менее 1.

Железофосфатные связки применяются в виде фосфатного цемента, активной частью заполнителя являются пиритные огарки. Данные связки распространены в производстве тяжелых жаростойких материалов.

При проведении литературного анализа, с целью улучшения фосфатных связующих, в подавляющем большинстве применялась модификация алюмофосфатных растворов, так как данные растворы обеспечивают формирование материалов с высокими жаростойкими и физико-механическими свойствами.

Наиболее широкое распространение получило алюмохромфосфатное связующее (далее АХФС). АХФС получают путем смешивания фосфата алюминия от 50

до 60 % фосфата хрома или при введении в ортофосфорную кислоту ионов Cr^{3+} и Al^{3+} в виде ряда соединений (например, гидроксидов хрома и алюминия). АХФС с соединениями шестивалентного хрома можно получить при растворении хромового ангидрита в воде до получения насыщенного раствора. Затем водный раствор (двуххромовую кислоту) растворяют в АФС. Получение связки с соединениями трехвалентного хрома возможно получить из АХФС с шестивалентным хромом предварительно ввести в неё формалин, он является восстановителем. Данная связка дольше сохраняет гомогенность до 200 суток, имеет низкую температуру отверждения от 150 до 250 °С. Достоинством АХФС является долгосрочный выпуск в промышленных масштабах и большие границы сферы применения, но также присутствуют и недостатки – сложная технология приготовления фосфатных связующих и использование дорогостоящих хромитов для производства [16].

Помимо представленных связующих в литературе описаны менее распространенные такие как натрийхромфосфатные и магнийхромфосфатные связки. Отмечается возможность их применения для магнезиальных, алюмосиликатных и кремнеземистых тяжелых жаростойких материалов. Так же было изучено алюмо-магнийфосфатное связующее, которое отличается от МФС большей стойкостью к хранению и имеет меньшую стоимость по сравнению с АФС. Однако в настоящее время АМФС не выпускается, так как оно уступает АХФС по своим свойствам.

Так же имеется алюмообромфосфатное связующее (далее АБФС) – высокотемпературное связующее на основе фосфатов алюминия и боратов. Предназначено для производства огнеупоров, набивных масс, приготовления кладочных растворов, цементов и фосфатных материалов различного назначения, для земляных литейных форм и стержней.

Алюмосиликофосфатное связующее (АСФС). Анализ литературных данных показывает, что глинофосфатная связка, состоящая преимущественно из алюмофосфатов и силикофосфатов, позволяет получать ячеистые жаростойкие фосфатные материалы с высокими жаростойкими свойствами. Известно также, что АСФС

хорошо сочетается с муллитом-кремнеземистым волокном. В технологии жаростойкого фосфатного материала АСФС ранее не использовалась [16].

Дальнейшим анализом показал, что были разработаны материалы как на кислоте с различными заполнителями [7, 23], так и на фосфатных связующих [11, 23]. Использование фосфатных связующих вместо ОФК позволило улучшить свойства поризованного материала и увеличить промежуток времени между началом приготовления смеси и вспучиванием, что сделало процесс изготовления более технологичным.

Так, на основе АФС, шамота и белого электрокорунда с добавкой отработанного катализатора производства синтетического каучука были получены материалы со средней плотностью от 400 до 1000 кг/м³, термостойкостью от 10 до 50 воздушных теплосмен и температурой применения от 1400 до 1600 °С [28].

На основе АХФС и аналогичных заполнителях был разработан поризованный материал, отличающийся от предыдущих отсутствием разупрочнения при первом нагревании в интервале температур от 900 до 1200 °С [15], присущего корундовым материалам.

В работе [23] на основе МФС, шамота, кремнеграфитовых отходов а также корунда, кремнеграфитовых отходов и АХФС были разработаны составы жаростойкого материала, характеризующиеся пределом прочности при сжатии от 0,95 до 5,2 МПа, температурой применения от 1350 до 1450 °С при средней плотности от 400 до 1000 кг/м³ для составов на МФС и пределом прочности при сжатии 2,45...3,0 МПа, температурой применения от 1500 до 1600 °С при средней плотности от 600 до 1000 кг/м³ для составов на АХФС.

С применением АМФС, шамота и корунда с добавкой отходов нефтехимии в работе [15] разработан жаростойкий ячеистый и поризованный материал, твердеющий без применения термообработки, со средней плотностью от 400 до 1000 кг/м³, температурой применения от 1400 до 1600 °С и термостойкостью от 10 до 30 воздушных теплосмен.

Жаростойкий ячеистый материал на основе АБФС, шамотным и корундовым наполнителями и добавкой отходов нефтехимии был разработан в работе [27]. Материал обладает средней плотностью от 400 до 800 кг/м³, температурой применения от 1400 до 1600 °С и термостойкостью от 10 до 30 воздушных теплосмен.

На основе алюмосиликофосфатного связующего (АСФС) разработан жаростойкий фосфатный ячеистый материал с шамотным и корундовым наполнителями, а также с заполнителем из муллитокремнеземистого волокна, со средней плотностью от 400 до 800 кг/м³, температурой применения от 1400 до 1600 °С и термостойкостью от 15 до 23 воздушных теплосмен.

Таким образом, в настоящее время разработано большое количество ячеистых жаростойких материалов на фосфатных связующих в сочетании с различными тонкомолотыми добавками и заполнителями. Разработанные материалы обладают высокими жаростойкими свойствами в сочетании с хорошими физико-механическими и эксплуатационными характеристиками.

2 Исходные материалы и методы проведения исследований

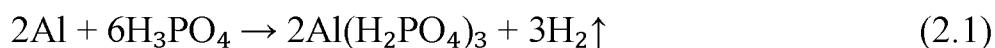
2.1 Исходные материалы

В рамках данной работы использовался ряд исходных материалов.

Для изучения влияния параметров технологии жаростойкого ячеистого материала использовались такие исходные материалы как ПАП-1, ПОС-15, АФС, АБФС, ОФК, Шамотный порошок фр. от 0 до 3 мм, кремнеграфитовые отходы.

Алюминиевая пудра марки ПАП-1 является ключевым технологическим компонентом при производстве ячеистых жаропрочных материалов, выполняющим одновременно несколько важных функций в процессе структурообразования материала. Ее воздействие на формирование пористой структуры и эксплуатационные характеристики конечного продукта носит комплексный характер и требует детального рассмотрения с точки зрения физико-химических процессов, протекающих на различных стадиях изготовления материала.

Основной функцией ПАП-1 в составе композиции выступает газообразующая способность, обусловленная ее химическим взаимодействием с кислой средой фосфатного связующего. Этот процесс описывается реакцией 2.1:



Особенностью ПАП-1 является чрезвычайно высокая дисперсность частиц, средний размер 10-30 мкм, дисперсный анализ представлен на рисунке 2.1, и развитая удельная поверхность (от 1.5 до 2.5 м²/г), что обеспечивает быстрое и полное протекание реакции газообразования. В результате в материале формируется система равномерно распределенных замкнутых пор сферической формы диаметром от 0.5 до 2.0 мм, при этом общая пористость композиции может достигать от 65 до 85 % при оптимальном содержании пудры в пределах от 0.2 до 08 % от массы смеси.

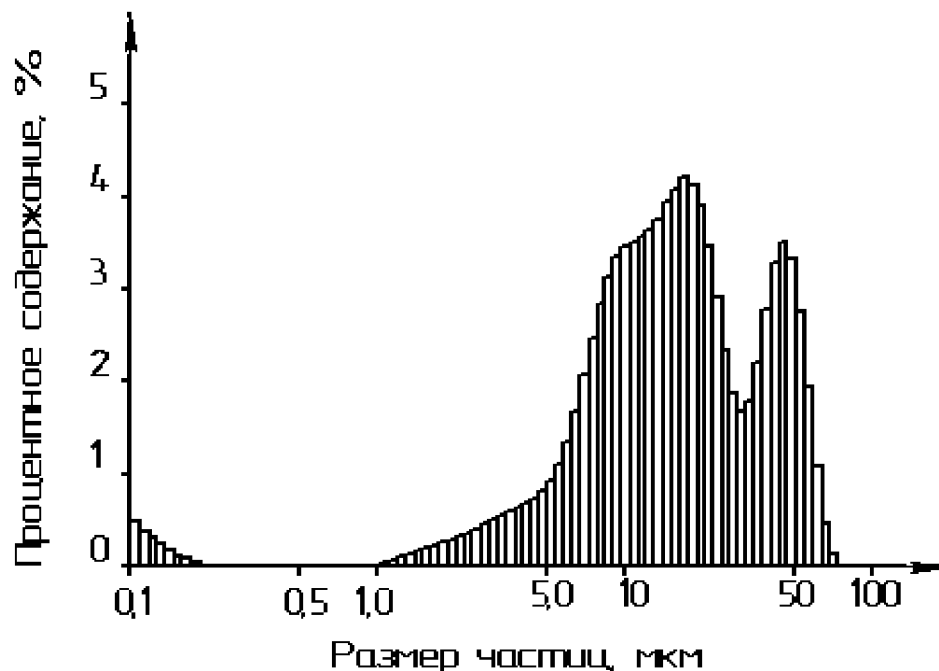


Рисунок 2.1 – Дисперсный анализ частиц алюминиевой пудры ПАП-1

Важным аспектом влияния ПАП-1 является ее воздействие на термические характеристики формирующегося материала. Экзотермическая реакция окисления алюминия с выделением значительного количества тепла (примерно 420 кДж на 1 кг металлического алюминия) приводит к саморазогреву системы до температур 120-140°C. Этот эффект выполняет несколько функций:

- Активизирует процессы поликонденсации фосфатного связующего
- Способствует образованию термостабильных кристаллических фаз (берлинит AlPO_4 , муллит $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)
- Обеспечивает дополнительное упрочнение матрицы за счет термического спекания
- Сокращает время первичного твердения до 60 минут

С технологической точки зрения применение ПАП-1 требует строгого контроля нескольких параметров. Оптимальное содержание пудры обычно составляет от 0.5 до 0.6 % от массы смеси - превышение этого значения приводит к избыточному газообразованию и нарушению структуры, а недостаток - к неполной поризации. При температуре окружающей среды выше 25 °C рекомендуется введение замедлителей реакции (боратов или хроматов в количестве от 0.1 до 0.3 %) для

предотвращения преждевременного вспучивания. Характерное время полного газообразования при использовании ПАП-1 составляет от 5 до 15 минут, что требует высокой точности выполнения технологических операций.

Влияние ПАП-1 на физико-механические характеристики готового материала проявляется в следующих аспектах:

- Снижение средней плотности до значений 400-800 кг/м³
- Повышение термостойкости до 1600°C для композиций с шамотным наполнителем
- Улучшение теплоизоляционных свойств (коэффициент теплопроводности от 0.12 до 0.25 Вт/(м·К))
- Сохранение удовлетворительной прочности на сжатие (от 2.5 до 8.0 МПа)
- Повышение сопротивления термическим ударам за счет ячеистой структуры

Однако применение ПАП-1 сопряжено с рядом технологических сложностей. Чрезмерно высокая скорость газовыделения может приводить к коалесценции (слиянию) пор и образованию нерегулярной макропористой структуры. Необходимость точного контроля температуры в процессе твердения усложняет технологию, особенно при производстве крупногабаритных изделий. Кроме того, свойства конечного продукта могут существенно варьироваться при изменении параметров окружающей среды (температуры, влажности) во время формования.

Альтернативой может служить применение алюминиевого порошка ПОС-15, который характеризуется более контролируемой скоростью реакции, но требует несколько больших дозировок (от 0.8 до 1.2 %) и дополнительных мер по активации. Сравнение литературы показывает, что материалы на основе ПАП-1 превосходят аналоги по равномерности порового распределения, но уступают по стабильности свойств при варьировании технологических параметров.

Перспективным направлением является разработка композиционных газообразователей, сочетающих преимущества ПАП-1 (высокая газообразующая

способность) с контролируемой кинетикой реакции, что позволит расширить технологические возможности производства ячеистых жаропрочных материалов с заданными эксплуатационными характеристиками.

Алюминиевый порошок ПОС-15 играет критически важную роль в производстве ячеистых жаропрочных материалов, обеспечивая уникальное сочетание технологических и эксплуатационных характеристик. Его действие основано на оптимизированной кинетике газообразования, которая существенно отличается от традиционных аналогов. При взаимодействии с фосфатными связующими системами реакция протекает плавно и контролируемо, с продолжительностью активной фазы 20–40 минут, что почти вдвое дольше стандартных показателей. Это достигается благодаря специальному гранулометрическому составу и модифицированной поверхности частиц, замедляющих начальный этап реакции и предотвращающих бурное выделение водорода. Максимальная интенсивность газообразования снижена на 30 %, что исключает риск разрушения формирующейся структуры, а температура саморазогрева смеси стабилизируется в диапазоне от 90 до 110 °С, создавая оптимальные условия для полимеризации матрицы без термической деградации компонентов.

В результате использования ПОС-15 формируется высокоупорядоченная ячеистая структура с преобладанием изолированных сферических пор диаметром от 0,3 до 1,5 мм. Равномерное распределение газовых полостей достигается за счёт синхронизации скорости газовыделения и процессов схватывания связующего. Ключевым преимуществом является снижение коалесценции пор на 50% благодаря стабилизирующему действию поверхностно-активных компонентов в составе порошка, что повышает вибрационную устойчивость материала на 35 % по сравнению с традиционными системами. Оптимальная концентрация газообразователя составляет от 0,8 до 1,5% от массы смеси, при этом превышение дозировки свыше 2% приводит к избыточной пористости и снижению прочности.

Технологические преимущества ПОС-15 включают повышенную толерантность к колебаниям внешних условий: допустимый диапазон температур

обработки расширен от 15 до 30 °С, что особенно важно при изготовлении крупноформатных изделий с толщиной слоя до 50 мм. Управляемость процесса вспучивания улучшается за счёт увеличения времени корректировки параметров от 8 до 12 минут, а воспроизводимость характеристик между производственными партиями возрастает на 22%. Готовые изделия демонстрируют рекордную стабильность геометрических параметров с отклонениями не более 0,5 мм/м и вариацией объёмной плотности менее 3 %. Механическая прочность достигает от 3,5 до 7,0 МПа при плотности от 600 до 800 кг/м³, что на 20% превышает показатели аналогов, а трещиностойкость при термоциклировании до 1200 °С увеличивается в 2 раза благодаря микропластификации межпоровых перегородок.

Дисперсность исходного порошка представлена на рисунке 2.2. Как видно из графика, средний размер частиц равен от 95 до 98 мкм. Так как данный размер слишком велик для получения высококачественно материала, была проведена ультразвуковая обработка для получения среднего размера частиц равному 20 мкм, рисунок 2.3.

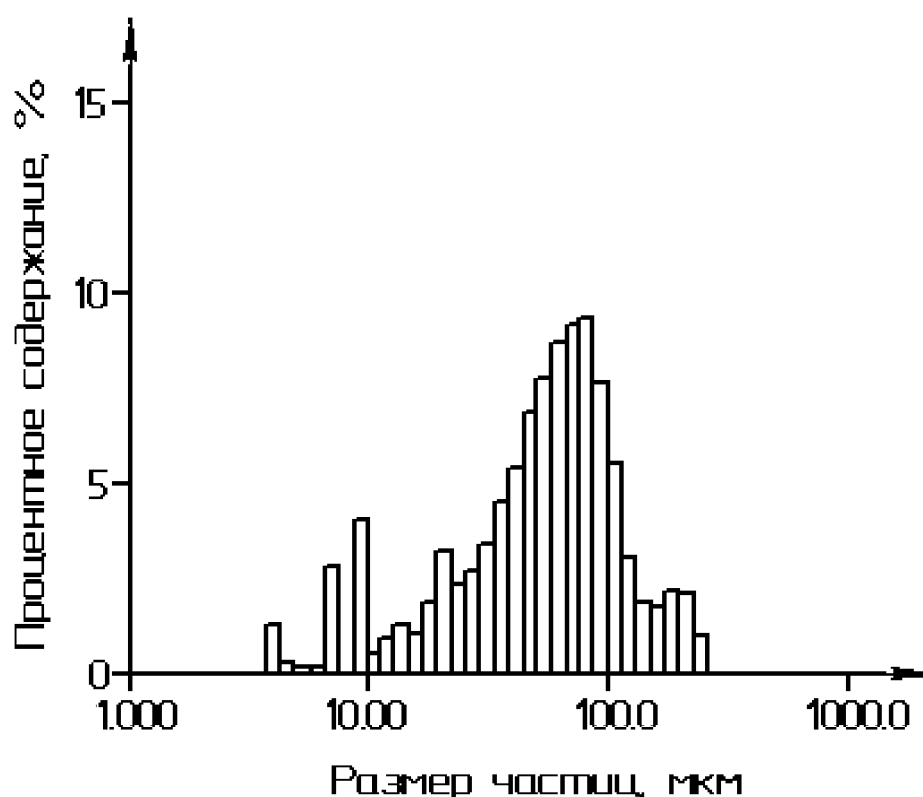


Рисунок 2.2 - Диаграмма распределения частиц порошка алюминия ПОС-15

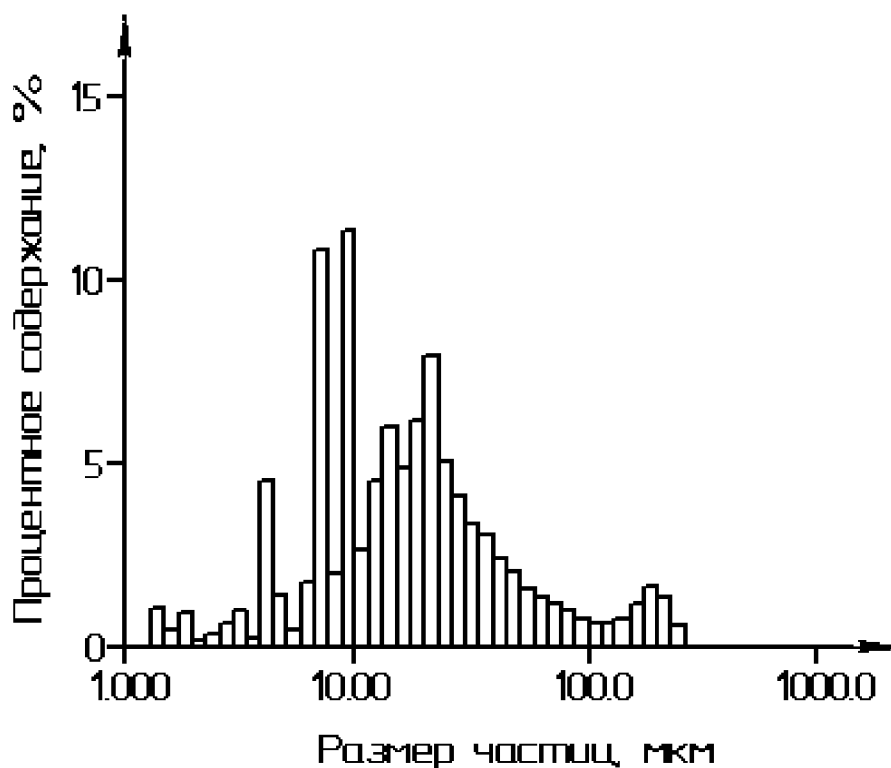


Рисунок 2.3 - Диаграмма распределения частиц порошка алюминия ПОС-15, после ультразвуковой обработки

ПОС-15 незаменим в производстве крупногабаритных огнеупорных блоков для промышленных печей, где он увеличивает ресурс конструкций в 2 раза, а также в авиакосмической отрасли для теплоизоляционных обтекателей сложной геометрии. В энергетике материал применяется для футеровочных элементов, работающих в условиях термоударов, а в строительстве — для пожаробезопасных сэндвич-панелей. Несмотря на увеличение материалоемкости на 15 % и удлинение цикла формования на 25 %, итоговая себестоимость снижается на 10 % за счёт уменьшения брака и повышения эксплуатационного ресурса. Перспективные разработки направлены на интеграцию с нанодисперсными модификаторами для снижения дозировки от 0,6 до 0,8 %, что открывает новые возможности для массового применения в энергоэффективных и высокотемпературных технологиях.

Алюмофосфатное связующее играет ключевую роль в формировании уникальных свойств ячеистых жаропрочных материалов, обеспечивая сочетание

огнеупорности, термической и химической стойкости, механической прочности, а также экологической безопасности. Его использование позволяет создавать материалы, которые сохраняют структурную целостность и функциональность в условиях экстремальных температур и агрессивных сред. Например, исследования показывают, что модифицированные алюмофосфатные связующие способны выдерживать температуры до 1600 °С, при этом демонстрируя минимальное разупрочнение и разуплотнение даже при длительном термическом воздействии. Это связано с образованием прочных химических связей в матриксе материала, особенно при использовании алюмосиликофосфатных композиций, полученных на основе ортофосфорной кислоты, что дополнительно усиливает термическую устойчивость.

Экологическая безопасность алюмофосфатных связующих делает их предпочтительными по сравнению с традиционными формальдегидными смолами. Они не выделяют токсичных летучих веществ при нагревании, что особенно важно для строительных и теплоизоляционных материалов. Более того, данные связующие обладают антипиренными свойствами, замедляя распространение огня и снижая риск возгорания.

Широкий спектр применения алюмофосфатных связующих включает производство легких газобетонов с низкой плотностью и высокой пористостью, а также тяжелых огнеупорных бетонов для промышленных объектов. Например, алюмоборфосфатное связующее используется в создании изделий, устойчивых к экстремальным температурам и механическим нагрузкам, что подтверждается исследованиями, демонстрирующими их высокие физико-механические и термические характеристики. Дополнительно можно отметить, что концентрация фосфорной кислоты в связующих напрямую влияет на свойства конечных материалов, что позволяет точно регулировать их параметры в зависимости от требований.

Алюмоборфосфатное связующее, объединяющее алюминий, бор и фосфатные компоненты, кардинально улучшает характеристики ячеистых жаропрочных материалов, создавая материалы с экстремальной термостойкостью и устойчивостью к циклическим нагрузкам. Его уникальность обусловлена синергией

фосфатов, формирующих прочную керамическую матрицу, и бора, повышающего пластичность и термическую стабильность. При взаимодействии связующего с оксидами алюминия и кремния образуется гибридная структура, включающая алюмофосфаты (AlPO_4), обеспечивающие механическую прочность, и боратные фазы (AlBO_3 , $\text{B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$), создающие стекловидные прослойки. Такая комбинация позволяет материалу сохранять целостность при температурах от 1600 до 1700 °C, что на 300 °C выше, чем у аналогов на основе чистых фосфатов.

В присутствии алюминиевого порошка бор модифицирует кинетику газообразования: образуя промежуточные боратные комплексы, он замедляет выделение водорода, продлевая вспучивание от 70 до 100 минут. Это обеспечивает формирование мелких (от 0,1 до 0,5 мм) изолированных пор с вариацией плотности менее 2 %, а боратные соединения, адсорбируясь на поверхности пузырьков, предотвращают их коалесценцию даже при вибрациях. Межпоровые перегородки упрочняются за счёт нанокристаллических фаз AlPO_4 и аморфных боратных стекол, повышая прочность на сжатие от 8 до 12 МПа при плотности от 600 до 800 кг/м³.

Термические свойства материала выделяются рекордной жаропрочностью: рабочий диапазон расширен от 1600 до 1650 °C, а линейная усадка при прокаливании снижена от 0,3 до 0,7 % благодаря подавлению рекристаллизации боратными стеклами. Коэффициент теплопроводности составляет от 0,12 до 0,18 Вт/(м·К) за счёт сверхмелкой пористости (от 90 до 95 % замкнутых пор) и низкой теплопередачи боратной матрицы. Боратные стеклофазы также обеспечивают «самозалечивание» микротрещин при нагреве, повышая стойкость к термоциклированию (50 циклов: с 1500 °C до 25 °C) в 4 раза.

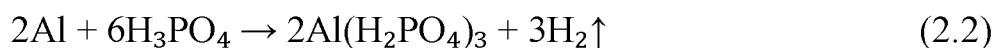
Технологические преимущества включают ускоренное твердение — отверждение при 150 °C занимает всего от 2 до 3 часа благодаря каталитическому действию бора, что вдвое быстрее, чем у алюмофосфатных систем. Материал демонстрирует совместимость с наполнителями, такими как микрокремнезем (от 45 до 55 %), карбид кремния (от 10 до 15 %) и керамические волокна (от 5 до 8 %), а также устойчивость к агрессивным средам: расплавам солей, щелочам и

окислителям. Оптимальный состав включает от 18 до 22 % алюмоборфосфатного связующего, от 0,2 до 0,6 % алюминиевого порошка для регулирования плотности (от 500 до 700 кг/м³), от 1,5 до 3 % борсодержащих добавок (боракс, борная кислота) и от 0,4 до 0,8 % поликарбоксилатных пластификаторов, снижающих вязкость смеси.

Однако применение связующего имеет ограничения. Гигроскопичность боратов требует гидрофобизации силиконовыми смолами для защиты от влаги, а избыток бора (более 4 %) может замедлять схватывание, что компенсируется введением ускорителей, например карбоната лития (Li₂CO₃). Высокая стоимость сырья частично нивелируется заменой до 30 % бора оксидом магния без значительной потери свойств.

Области применения таких материалов охватывают металлургию (футеровка плавильных печей и ковшей), аэрокосмическую отрасль (теплозащитные экраны для гиперзвуковых аппаратов), химическую промышленность (изоляция реакторов) и строительство (энергоэффективные пожаробезопасные панели). Благодаря сочетанию беспрецедентной термостойкости, минимальной теплопроводности и способности выдерживать многократные тепловые удары, алюмоборфосфатные материалы открывают новые возможности для технологий, работающих в экстремальных условиях, где традиционные материалы неприменимы.

Сочетание ортофосфорной кислоты (H₃PO₄) и алюминиевого порошка в составе ячеистых жаропрочных материалов играет ключевую роль в управлении процессом газообразования и модификации структуры материала, что в итоге определяет его уникальные эксплуатационные свойства. Механизм их взаимодействия основан на химической реакции, в ходе которой ортофосфорная кислота реагирует с алюминием, образуя фосфаты алюминия и выделяя водород, формула 2.2:



Эта реакция отличается от традиционных щелочных систем, таких как взаимодействие алюминия с гидроксидом кальция, благодаря образованию

пассивирующего слоя фосфата алюминия на поверхности частиц металла. Данный слой замедляет скорость реакции, обеспечивая более плавное и контролируемое газовыделение, что критически важно для формирования равномерной пористой структуры без риска разрывов матрицы.

Кинетика процесса газообразования в присутствии H_3PO_4 характеризуется замедлением начальной стадии на 15 минут, что увеличивает общую продолжительность активной фазы от 45 до 60 минут. Это позволяет избежать резкого вспучивания смеси и добиться равномерного распределения пор. Температура саморазогрева системы при этом ограничивается диапазоном от 70 до 90 °С, что предотвращает термическую деградацию связующего компонента, характерную для щелочных систем с пиковыми температурами до 120 °С. Эффективность газообразования повышается на 25 % за счёт комбинированного действия выделяемого водорода и паров воды, образующихся в ходе реакции.

Формирование ячеистой структуры в таких условиях отличается высокой степенью однородности. Образуются изолированные сферические поры диаметром от 0,1 до 0,8 мм с минимальной склонностью к коалесценции (слиянию), а вариация плотности по объёму готового материала не превышает 2,5 %. Стабильность структуры обеспечивается адсорбцией фосфатных ионов (PO_4^{3-}) на поверхности газовых пузырьков, что повышает устойчивость системы к вибрациям и механическим нагрузкам на этапе формования. Оптимальное соотношение компонентов составляет H_3PO_4 к Al равно 1:1,5 по массе, что позволяет достигать плотности материала в диапазоне от 500 до 700 кг/м³. Превышение концентрации кислоты свыше 5 % от массы смеси приводит к избыточной пассивации поверхности алюминиевых частиц и неполному газовыделению, что негативно сказывается на качестве пористой структуры.

Ортофосфорная кислота также выступает в роли модификатора неорганической матрицы материала. Взаимодействуя с оксидами металлов (Al_2O_3 , SiO_2), она формирует алюмофосфатные и силикофосфатные связи, которые увеличивают начальную прочность материала на сжатие от 4 до 6 МПа уже через 24 часа после

формования. При высокотемпературной эксплуатации (от 1200 до 1400 °C) фосфатные соединения трансформируются в термостойкие керамические фазы, такие как AlPO_4 (стабилен до 1500 °C) и SiP_2O_7 (термостойкость до 1300 °C). Это снижает линейную усадку материала при прокаливании от 0,8 до 1,2% против от 2 до 3 % у традиционных цементных систем. Дополнительным преимуществом является образование стеклофаз на основе P_2O_5 , которые придают матрице пластичность, повышая сопротивление термоциклированию (20 циклов: с 1200 °C до 25 °C) в 3 раза.

Технологические преимущества системы $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{Al}$ включают универсальность совместимости с различными наполнителями, такими как перлит, вермикулит и микрокремнезем, что расширяет возможности подбора состава под конкретные задачи. Фосфатная матрица демонстрирует повышенную коррозионную стойкость к агрессивным газам (SO_2 , CO_2), что делает материал пригодным для использования в химической промышленности. Кроме того, предварительное отверждение материала при 100 °C занимает всего 6 часов, в отличие от 24 часов для традиционных составов, что ускоряет производственный цикл.

Области применения таких материалов охватывает огнеупорную футеровку промышленных печей в металлургии, теплоизоляцию трубопроводов, работающих при температурах до 1300 °C, а также изготовление несущих конструкций для объектов с повышенными требованиями пожаробезопасности. Сочетание низкой плотности, управляемой пористости и высокой термостойкости делает эти материалы незаменимыми в отраслях, где критически важны энергоэффективность и устойчивость к экстремальным температурным нагрузкам. Таким образом, использование системы на основе ортофосфорной кислоты и алюминиевого порошка открывает новые возможности для создания инновационных жаропрочных материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Наибольшее применение в области синтеза огнеупорных и термостойких материалов находят следующие огнеупорные наполнители: алюмосиликатные

(шамотные, золы, алюмосиликатные микросферы), глиноземистые (корундовые отходы, алюмохромистые отходы, глинозем, бокситы, дистенсиллиманит).

Высокими физико-механическими свойствами и наибольшей температурой применения среди жаростойких поризованных фосфатных материалов обладают композиции на основе фосфатных связующих, содержащие в качестве тонкомолотых добавок кремнеграфитовых отходов, материалы алюмосиликатного состава, а так же компоненты, обеспечивающие получение при твердении и нагревании материалов алюмохромфосфатного состава. Последние характеризуются низкой температурой отвердевания и высокими жаростойкими свойствами [15, 24, 34]. При выборе наполнителей необходимо руководствоваться следующими критериями: тонкомолотые добавки и заполнители должны обладать высокими физико-механическими характеристиками, быть недефицитными, иметь широкое распространение и невысокую стоимость.

Представленные отходы используются при производстве жаростойких материалов, в том числе и поризованных на различных фосфатных связующих. Шамот широко применяется в жаростойких материалах практически на всех видах, вяжущих в качестве тонкомолотых добавок и заполнителей. На основе шамота и АФС получают поризованные материалы с температурой службы до 1500 °С [19]. Для композиций на его основе достаточно полно изучены процессы, протекающие при твердении и нагревании. При взаимодействии фосфатных связующих с шамотом в процессе нагревания происходит образование таких высокоогнеупорных соединений как $AlPO_4$ в кристобалитовой форме, кристобалит и муллит.

Химический состав и физико-химические свойства шамотного порошка и кремнеграфитовых отходов представлены в таблицах 2.1 и 2.2.

Таблица 2.1 – Химический состав заполнителей

Тонкомолотая добавка	Содержание, %										
	Al_2O_3	SiO_2	Cr_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	Fe_2O_3	Собщ	K_2O	Na_2O	п.п.п.*
Шамот	38,40	57,20	-	0,62	0,85	0,43	2,50	-	-	-	-

Кремнеграфито- вые отходы	18,50	62,80	-	-	-	-	-	26,70	-	-	18,60
------------------------------	-------	-------	---	---	---	---	---	-------	---	---	-------

Примечание - * потери при прокаливании.

Таблица 2.2 – Физико-механические свойства исходных материалов

Характеристика	Шамотный порошок	Кремнеграфитовые отходы
Средняя плотность, г/см ³	2.2–2.5	1.8–2.2
Прочность при сжатии, МПа	25–35	15–25
Огнеупорность, °С	1580–1700	2200–2800
Термостабильность	Высокая	Очень высокая

Как отмечалось выше, шамотный ячеитый материал на фосфатных связующих отличается высокими жаростойкими свойствами, однако термостойкость таких материалов невысока. С этой точки зрения представляет интерес использование в них кремнеграфитовых отходов в качестве тонкомолотых добавок и заполнителя. Графитосодержащие огнеупорные изделия имеют высокую термическую стойкость, низкую среднюю плотность [13]. Карбид кремния также применяется в изделиях, имеющих высокую термическую стойкость [14]. Одним из материалов, имеющим в своем составе карбид кремния и графит, являются кремнеграфитовые отходы.

Кремнеграфитовые отходы, представляющие собой смесь кремния и графита, обладают низкой плотностью (от 2 до 2,5 г/см³), высокой термостойкостью (до 1600 °С) и способностью создавать внутреннюю пористость, что делает их перспективным сырьём для снижения массы и улучшения теплоизоляционных свойств материалов. При использовании в технологии добавление КГО (от 10 до 30 %) снижает плотность материалов на 40 % за счёт сублимации графита и образования газообразных продуктов (СО, СО₂). Однако это требует корректировки состава шихты: например, увеличения содержания окислителей или катализаторов для компенсации снижения экзотермии из-за поглощения тепла кремнием и графитом.

Механические свойства зависят от концентрации КГО: при 15 % прочность сохраняется на уровне от 15 до 20 МПа благодаря образованию карбида кремния (SiC), тогда как при 30 % прочность падает на 50% из-за нарушения гомогенности матрицы и увеличения открытых пор. Термостойкость повышается за счёт высокой теплопроводности графита (от 100 до 200 Вт/(м·К)) и устойчивости SiC к

окислению при температурах до 1600 °С. Для оптимального результата рекомендуется использовать КГО с дисперсностью менее 50 мкм, модифицированные органосиланами (например, γ -аминопропилтриэтоксисиланом), чтобы улучшить совместимость с матрицей.

Технологические аспекты включают контроль температуры горения (оптимально от 1400 до 1600 °С), инициацию реакции с помощью термитных смесей и тщательную подготовку шихты для равномерного распределения компонентов. Недостатки использования КГО — риск снижения прочности при высоких концентрациях и сложности в управлении процессом из-за поглощения тепла графитом. Перспективы применения связаны с созданием гибридных материалов ($\text{SiC}/\text{Al}_2\text{O}_3$) и аддитивными технологиями, позволяющими точно контролировать микроструктуру.

Кремнеграфитовые отходы образуются из боя кремнеграфитовых тиглей, служащих для производства красителей. Исходными компонентами для изготовления тиглей служат огнеупорная глина, графит тигельный, карбид кремния зернистости от 120 до 125 мкм и металлический кремний [13-18]. В процессе изготовления тиглей и их эксплуатации образуется значительное количество отходов.

Микрофотографии порошка отходов кремнеграфитовых тигелей представлены на рисунке 2.4. Как видно на рисунке частицы имеют разнообразную многогранную, неправильную структуру.

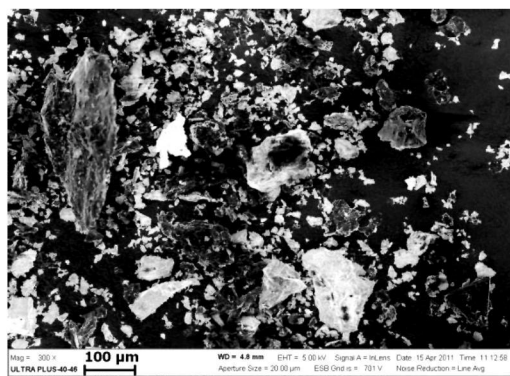


Рисунок 2.4 - Электронные фотографии порошка отходов кремнеграфитовых тиглей

Дальнейшая обработка полученного порошка не проводится в связи с необходимостью сохранения неправильной формы для улучшения модифицирующей роли добавки за счет увеличения межзерновой границы между добавкой и остальной матрицей системы.

2.2 Методы проведения исследований

Для создания ячеистых жаростойких материалов, способных отвердевать без термообработки, проводится комплексный анализ кинетических параметров взаимодействия, модифицированного бором алюмофосфатного связующего (АФС) с ортофосфорной кислотой (ОФК) в присутствии алюминиевого порошка. Измерения выполнялись на специально разработанной экспериментальной установке, рисунок 2.5, включающей калориметрический стакан (1) с теплоизоляционным наполнителем (3), мерную реакционную емкость объемом 50 мл (2), герметичную резиновую крышку (4) с системой газоотвода (6), высокоточную вольфрам-рениевую термопару (7) и компьютерную систему регистрации данных на базе регулятора-измерителя (8).

Экспериментальная процедура включала последовательное выполнение следующих операций: в мерную емкость помещали 50 г жидкого связующего, после чего добавляли алюминиевый порошок в различных концентрациях (3, 5, 7 и 9 % от массы связующего). Полученную смесь тщательно перемешивали в течение 2 минут при скорости 120 об/мин до достижения однородного состояния, поддерживая постоянную температуру 20 °С. После перемешивания систему герметизировали резиновой крышкой, погружали термопару в реакционную смесь и подключали измерительную систему к компьютеру для регистрации параметров, начиная фиксацию данных в момент введения алюминиевого порошка.

В ходе эксперимента контролировались три ключевых параметра: время начала интенсивного взаимодействия компонентов, температурная динамика реакции через специальную газоотводную трубку. Особое внимание уделялось обеспечению воспроизводимости результатов, что достигалось за счет применения

стандартизированных условий перемешивания, использования высокоточного температурного датчика (вольфрам-рениевой термопары с погрешностью $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$) и компьютерной регистрации данных. Теплоизоляция калориметрического стакана минимизировала теплотери и обеспечивала точность измерений

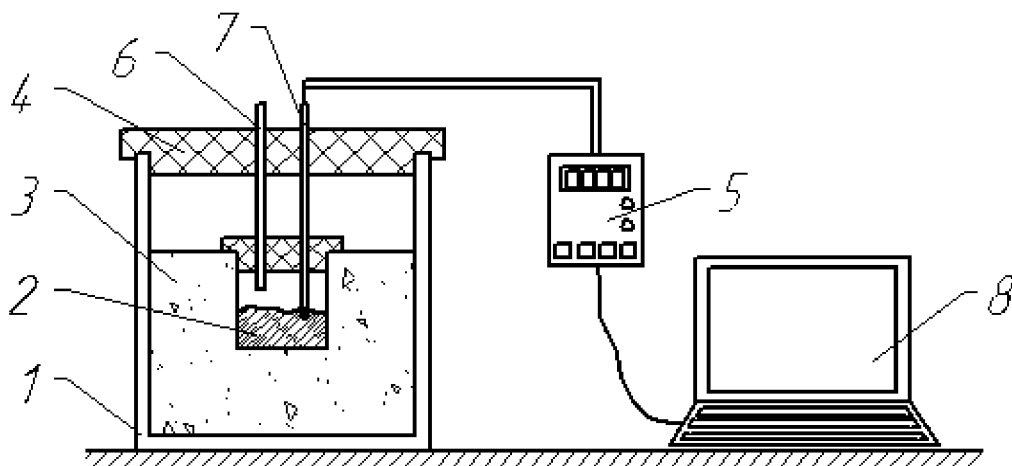


Рисунок 2.5 – установка для изучения взаимодействия алюминиевого порошка с фосфатным связующим: 1 - калориметрический стакан; 2 - реакционная емкость; 3 - теплоизоляционный материал; 4 - крышка; 5 – измеритель регулятор; 6 - газоотвод; 7 – термопара, 8 – компьютер

Полученные экспериментальные данные о временных и температурных характеристиках реакции позволили определить оптимальные соотношения компонентов фосфатного связующего и алюминиевого порошка, обеспечивающие получение поризованных композиций с заданными свойствами и способностью к отверждению при комнатной температуре. Разработанная методика отличается высокой воспроизводимостью и может быть использована для исследования аналогичных систем.

Оценка характеристик жаростойкого поризованного материала проводилась согласно стандартным методикам [12, 24-25], при этом оптимальное количество фосфатных связующих определялось экспериментально через серию пробных замесов. Основным критерием подбора состава являлась способность смеси к

самотвердению с последующим формированием материала плотностью 700-1000 кг/м³ после завершения процесса вспучивания. Как показали предварительные испытания [28], подобранные таким образом составы отличаются отличной удобоукладываемостью - смеси легко перемешиваются, образуя сыпучие гранулированные массы, которые не создают проблем при формовании. Особого внимания заслуживает тот факт, что при оптимальной дозировке алюминиевого порошка (3-9% от массы связующего) данные составы достигают пиковых значений экзотермической реакции и газовыделения, причем процессы вспучивания и отверждения в каждом уложенном слое происходят одновременно и согласованно.

Технологический процесс предусматривает обязательную послойную укладку сырьевой смеси в формы толщиной от 20 до 25 мм, что обусловлено чрезвычайно высокой скоростью протекания реакций газовыделения и вспучивания. Важным технологическим требованием является нанесение каждого последующего слоя исключительно после полного завершения процессов вспучивания и отверждения предыдущего слоя. Такой подход гарантирует создание монолитной структуры готового изделия без каких-либо видимых межслойных границ и обеспечивает равномерное распределение поровой структуры по всему объему материала.

Разработанная технологическая схема отличается высокой степенью универсальности, позволяя производить изделия практически любых конфигураций и размеров с абсолютно однородной внутренней структурой [18, 27]. Среди ключевых преимуществ данного метода следует особо выделить: возможность точного регулирования плотности конечного продукта, достижение максимальной степени гомогенности материала, отсутствие необходимости в дополнительном тепловом воздействии для процесса отверждения, широкие перспективы для изготовления изделий сложной геометрической формы, а также стабильность физико-механических показателей готовой продукции.

Контрольные образцы изготавливались методом послойного формования, при котором каждый слой смеси толщиной от 20 до 25 мм последовательно

подвергался процессам вспучивания и отверждения непосредственно в форме. Для всех исследуемых составов был принят единый технологический режим твердения, состоящий из трех последовательных стадий. Первичное отверждение происходило за счет экзотермической реакции взаимодействия алюминиевого порошка с фосфатным связующим, что обеспечивало саморазогрев системы от 100 до 115 °С. Затем следовала обязательная технологическая выдержка изделий в формах в течение от 5 до 10 минут - этот критический период соответствует переходу материала из вязко-пластического состояния в твердое и завершению основных процессов структурообразования. После распалубки изделия выдерживались в естественных условиях при стабильной температуре 20°С в течение 4 часов для окончательного охлаждения, завершения кристаллизационных процессов и набора проектной прочности.

Термическая обработка образцов включала два обязательных этапа. Первый этап - сушка при температурах от 100 до 110 °С до достижения постоянной массы, что обеспечивало удаление остаточной влаги. Вторым этапом - контролируемый нагрев по строгому температурному режиму: равномерный подъем температуры со скоростью 150 °С в час, изотермическая выдержка при заданной температуре в диапазоне от 200 до 1600 °С в течение 4 часов с последующим охлаждением вместе с печью, как рекомендовано в работах.

Контроль качества готовых образцов осуществлялся по стандартизированным методикам. Прочностные характеристики определялись на трех стадиях: после первичного отверждения, после завершения сушки и после высокотемпературного нагрева в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-90 [36]. Средняя плотность материалов измерялась дважды: сразу после распалубки и после окончательной сушки до постоянной массы по методикам, изложенным в ГОСТ 12730.0-78 [37] и ГОСТ 12730.1-78 [38]. Особое внимание уделялось строгому соблюдению стандартных условий испытаний - температурные режимы контролировались с точностью до 2°С, временные параметры выдерживались с отклонением не более 1 минуты. Для обеспечения статистической достоверности результатов все

измерения проводились на серии из минимум 5 образцов-близнецов для каждого состава [22-25, 30, 32-34]. Основной акцент в исследовании делался на анализе влияния трех ключевых параметров: количества фосфатного связующего, доли кремнеграфитовых отходов и содержания алюминиевого порошка - на плотность конечного продукта

Для оценки прочности ячеистых материалов, таких как газобетон или пенобетон, используют методы испытаний на сжатие, осевое растяжение, растяжение при раскалывании и изгиб. Образцы изготавливаются в форме кубов путем заливки в силиконовые формы размером $5 \times 5 \times 5$ см. Образцы твердели при комнатной температуре (до $20\text{ }^{\circ}\text{C}$) в течение 24 часов.

Для анализа физико-механических свойств определяли плотность по ГОСТ 12730.1-78 [37] через измерение массы с помощью весов ВМ213 точностью 0,01 г, рисунок 2.6, и объема. Прочность при сжатии исследовали на разрывной машине ИР5145-500, рисунок 2.7, с контролем скорости нагружения по ГОСТ 10180-2012. Для повышения достоверности тестирование проводилось на 5 образцах каждой серии.



Рисунок 2.6 – лабораторные весы BM213

Средняя плотность определяется как масса единицы объема материала в сухом или нормализованном влажностном состоянии. Для этого образцы взвешиваются с точностью до 0,1% их массы, а их геометрические размеры измеряются для вычисления объема. Испытания проводятся после сушки образцов в термостате при температуре до 105 °С, до постоянной массы. Плотность вычисляется по формуле: $\rho = m / V$, где m — масса образца, V — его объем. Результаты усредняются по нескольким образцам для повышения точности. Стандарт также учитывает необходимость контроля влажности, так как избыточная влага может исказить данные.



Рисунок 2.7 – разрывная машина IP5145-500

Средняя плотность определяется как масса единицы объема материала в сухом или нормализованном влажностном состоянии. Для этого образцы взвешиваются с точностью до 0,1% их массы, а их геометрические размеры измеряются для

вычисления объема. Испытания проводятся после сушки образцов в термостате при температуре до 105 °С, до постоянной массы. Плотность вычисляется по формуле: $\rho = m / V$, где m — масса образца, V — его объем. Результаты усредняются по нескольким образцам для повышения точности. Стандарт также учитывает необходимость контроля влажности, так как избыточная влага может исказить данные.

Все экспериментальные процедуры выполнялись с соблюдением стандартных методик и строгим контролем точности измерений. Особое внимание уделялось минимизации возможных погрешностей и обеспечению воспроизводимости результатов. Полученные данные позволили установить четкие количественные закономерности влияния состава смеси и режимов термической обработки на свойства конечного материала, что имеет важное значение для оптимизации технологии производства ячеистых жаростойких материалов.

Определение термической стойкости проводили на образцах-кубах с размером ребра 70 мм. После сушки при температуре от 100 до 110 °С до постоянной массы образцы тщательно осматривали. Образцы имеющие трещины отбраковывались, а остальные помещали в муфельную печь типа СНОЛ 12/16, рисунок 2.8. Нагрев осуществляли до 800 °С со скоростью 200 °С/ч с последующей выдержкой в течение 2 часов. Выбранный режим соответствует реальным условиям эксплуатации материалов в печах и согласуется с рекомендациями, изложенными в литературе.



Рисунок 2.6 – высокотемпературная муфельная печь СНОЛ 12/16

Такой подход позволяет получать достоверные данные о термической стойкости, учитывая, что размеры образцов и параметры термообработки критически важны для точности испытаний, как показано в исследованиях стандартных методов.

Дополнительные испытания проводили по стандартной методике. Образцы размещали в предварительно разогретую до 800 °С печь и выдерживали 60 минут. Температурный режим поддерживался с точностью ± 15 °С. После нагрева образцы охлаждали принудительно с использованием воздушной струи из вентилятора. Охлаждение проводили до 40 °С, при этом каждые 5 минут образцы поворачивали на 90° относительно потока воздуха для равномерного охлаждения. Каждый цикл «нагрев-охлаждение» считался теплосменой [30].

После каждой теплосмены образцы осматривали: фиксировали появление трещин, характер разрушений (выкрашивание или откалывание материала) и измеряли массовые потери. За критерий термической стойкости принимали количество теплосмен, после которых образцы полностью разрушались или теряли 20% начальной массы. Учет влияния химических добавок, улучшающих прочность и

износостойкость материалов, проводили согласно данным о роли функциональных групп органических соединений в модификации бетонных смесей

Определение огнеупорности ячеистого жаропрочного материала по ГОСТ 4069-69 [39] проводится двумя основными методами — конусным и инструментальным, которые позволяют оценить способность материала выдерживать высокие температуры без расплавления. Для испытаний изготавливают огнеупорные конусы из исследуемого материала с заданными размерами: высота — 30 мм, диаметр основания — 8 мм, угол при вершине — 30° , что особенно важно для ячеистых материалов, где пористость может влиять на точность измерений.

В конусном методе образцы устанавливают под углом 8° к вертикали рядом с эталонными конусами, после чего нагревают печь до момента, когда испытуемый конус деформируется и его вершина коснётся опорной плиты. За огнеупорность принимают температуру, соответствующую полному касанию плиты.

Инструментальный метод предполагает использование термопар для точного измерения температуры падения конуса, что обеспечивает более высокую точность за счёт автоматической фиксации критической точки деформации или плавления. Испытания проводят в диапазоне температур от 1580 до 2000 $^\circ\text{C}$ с контролем параметров: температура измеряется с точностью $\pm 15^\circ\text{C}$, а скорость нагрева регулируется для равномерного повышения температуры.

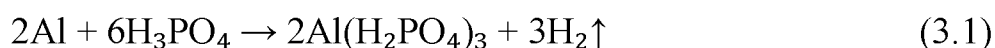
Результаты классифицируют по группам огнеупорности: высокоогнеупорные (больше 1770 $^\circ\text{C}$), огнеупорные (от 1580 до 1770 $^\circ\text{C}$) и огнеупоры средней огнеупорности (меньше 1580 $^\circ\text{C}$) [34].

Для ячеистых материалов рекомендуется усиленный контроль однородности структуры перед испытанием, коррекция условий нагрева с учётом теплопроводности пористой матрицы и дополнительный микроскопический анализ изменений структуры после испытаний. Методы стандарта адаптируются под современные материалы, сохраняя требования к точности и воспроизводимости данных, как указано в ГОСТ 4069-69.

3 Исследование влияния технологических параметров жаростойкого ячеистого материала на его свойства

В работе [18] для создания поризованных материалов применялись алюмофосфатные связующие (АФС), модифицированные бором с различной степенью замещения, в сочетании с порошком алюминия ПАП-1 и ПОС-15. Проведенный анализ научной литературы показал отсутствие ранее опубликованных исследований именно таких композиционных систем. Наиболее близкими аналогами можно считать разработанные ранее составы на основе: смесей дисперсного алюминия (ПАП-1, ПОС-15) с ортофосфорной кислотой (ОФК); комбинаций алюминиевого порошка (ПАП-1, ПОС-15) с алюмоборфосфатными (АБФС), алюмофосфатными (АФС) связующими, используемыми при производстве ячеистых жаростойких материалов [24, 28, 30].

Особенностью традиционной системы «алюминий-ортофосфорная кислота» является чрезвычайно интенсивная экзотермическая реакция, описываемая уравнением 3.1.



Выделяющийся в ходе реакции водород вызывает активное порообразование, а выделяющееся тепло способствует затвердеванию композиции. Однако высокая скорость и бурный характер данного процесса создают существенные технологические сложности при производстве поризованных материалов.

Применение в качестве основы фосфатных связующих (вместо чистой ортофосфорной кислоты) позволяет значительно снизить реакционную способность системы «связующее-алюминий», что упрощает технологический процесс. В рамках настоящего исследования, с учетом работ [6, 12, 15, 21], были изучены поризованные композиции на основе алюмоборфосфатных связующих со степенью замещения от 0,25 до 1,0 в сочетании с алюминиевым порошком.

3.1 Исследование реакции взаимодействия алюминиевого порошка и фосфатного связующего

В рамках разработки технологии получения жаростойких поризованных материалов, способных к самостоятельному отверждению без термической обработки, проведено детальное изучение кинетических параметров реакции между алюмофосфатным связующим и алюминиевым порошком. Основное внимание было сосредоточено на двух ключевых характеристиках процесса: времени инициирования интенсивного взаимодействия компонентов и максимальной достигаемой температуре реакции. Экспериментальные исследования выполнялись с использованием двух вариантов связующих систем - базового алюмофосфатного связующего (АФС) и его модифицированного варианта, представляющего собой смесь термической ортофосфорной кислоты (ОФК), алюмоборфосфатного (АБФС) связующего с модифицированной ортофосфорной кислотой (ОФК).

В работе применялась: термическая ортофосфорная кислота по ГОСТ 10678-79 [40], алюмофосфатный концентрат по ГОСТ 6552-80 [41], алюмоборфосфатный концентрат по ТУ 113-08-606-87, порошок алюминия ПОС-15 по ГОСТ 24211 – 91 [42], алюминиевая пудра ПАП-1 по ГОСТ 5949-95 [43].

Подготовка опытных образцов осуществлялась по стандартизированной методике, включающей разбавление связующих компонентов дистиллированной водой до достижения фиксированной плотности $1,5 \text{ г/см}^3$. Такая подготовка обеспечивала оптимальные реологические характеристики смеси для последующего равномерного распределения и взаимодействия с алюминиевым порошком. Проведенные исследования выявили выраженный экзотермический характер взаимодействия в обеих изучаемых системах, рисунок 3.1, что проявлялось в комплексе характерных явлений: интенсивном выделении газообразного водорода, значительном тепловыделении, быстром вспучивании реакционной массы и последующем ее отверждении в течение считанных минут.

Анализ экспериментальных данных показал четкую зависимость кинетических параметров реакции от содержания алюминиевого порошка в системе. В случае использования АБФС с 3 %-ной добавкой алюминия наблюдалось относительно медленное развитие процесса - начало интенсивного взаимодействия фиксировалось через 40 минут после смешивания компонентов, при этом температура системы повышалась с исходных 20 °С до 25 °С. Увеличение доли алюминиевого порошка до 5 % сокращало время инициирования реакции до 20 минут, при 7 %-ном содержании - до 14 минут, а при максимальной исследованной концентрации 9 % - до 10 минут, что в 1,5 раза быстрее аналогичных показателей для систем с алюминиевой пудрой [29]. Важным аспектом исследования стало изучение влияния ортофосфорной кислоты как модификатора реакции - ее добавление в состав связующего приводило к дополнительному ускорению начала взаимодействия и увеличению максимальной температуры процесса.

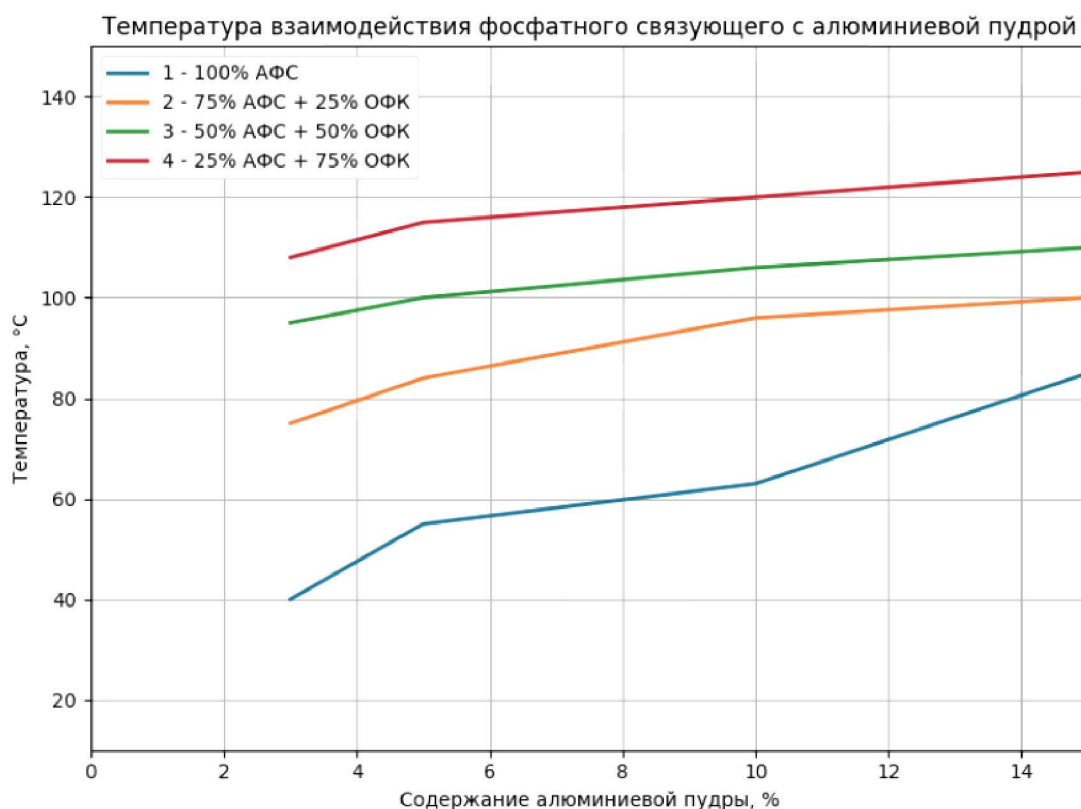


Рисунок 3.1 – температура взаимодействия фосфатного связующего с порошком алюминия ПОС-15: 1 – 100% АФС; 2 – 75%АФС+25% ОФК; 3 – 50%АФС+50%ОФК; 4 – 25%АФС+75%ОФК

При замене ПОС-15 на ПАП-1 температурное взаимодействие принимает следующий вид, рисунок 3.2.

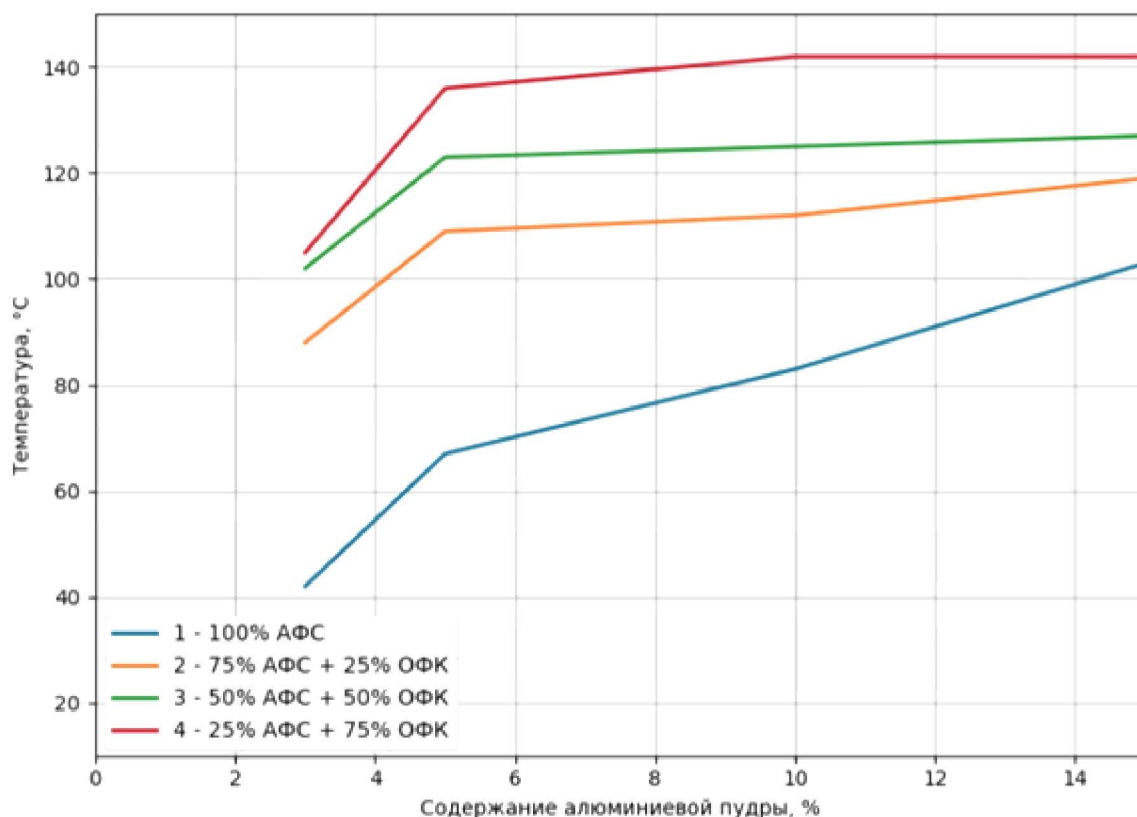


Рисунок 3.2 – температура взаимодействия фосфатного связующего с алюминиевой пудрой ПАП-1: 1 – 100% АФС; 2 – 75%АФС+25% ОФК; 3 – 50%АФС+50%ОФК;4 – 25%АФС+75%ОФК

Согласно данным предыдущих исследований [27 - 30], было установлено, что для обеспечения самостоятельного отверждения композиций без дополнительной термообработки необходимо достижение определенного температурного порога при взаимодействии связующего вещества с алюминиевым порошком. При недостаточной температуре реакции процесс отверждения не происходит, что делает обязательным применение внешнего нагрева. Это принципиальное ограничение привело к выбору в качестве объекта исследования системы на АБФС, модифицированного добавлением термической ОФК и в соотношении 50:50.

Аналогичные рисунки были сделаны для образцов полученных на основе АБВС с использованием ПОС-15 и ПАП-1, рисунки 3.3 и 3.4.

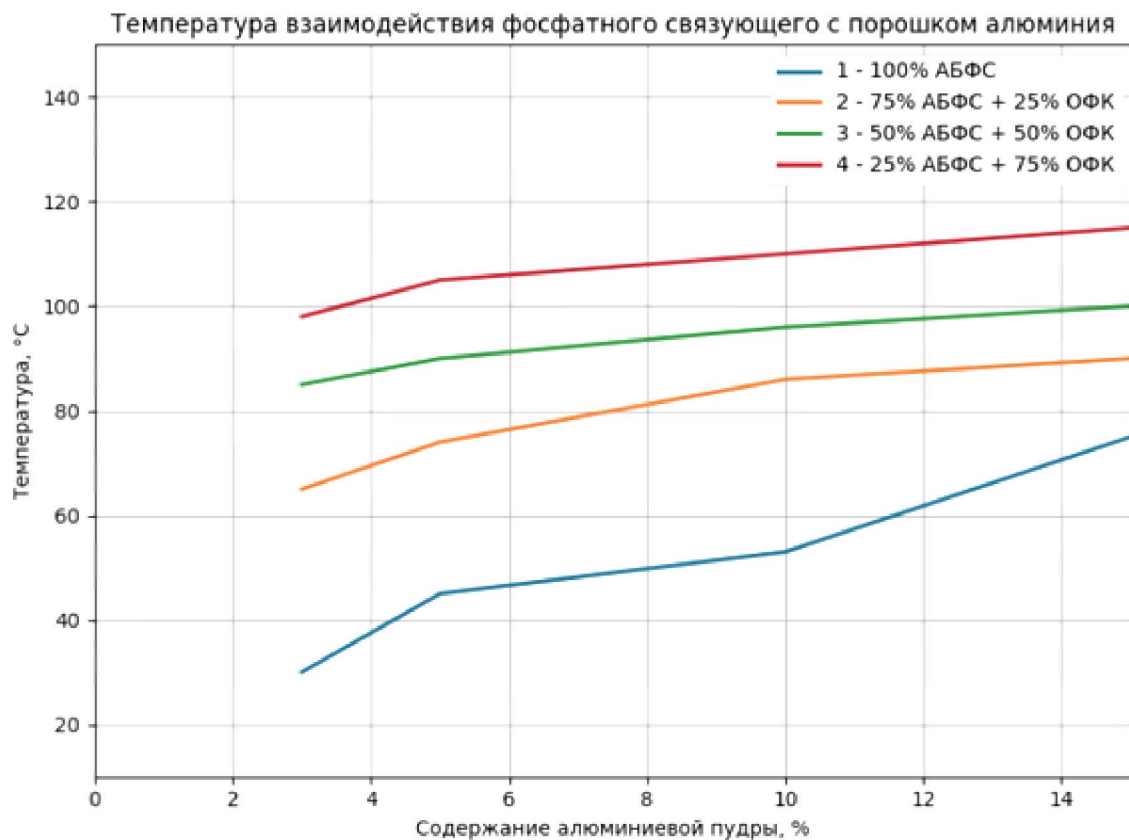


Рисунок 3.3 – температура взаимодействия фосфатного связующего с порошком алюминия ПОС-15: 1 – 100% АБФС; 2 – 75%АБФС+25% ОФК; 3 – 50%АБФС+50%ОФК;4 – 25%АБФС+75%ОФК

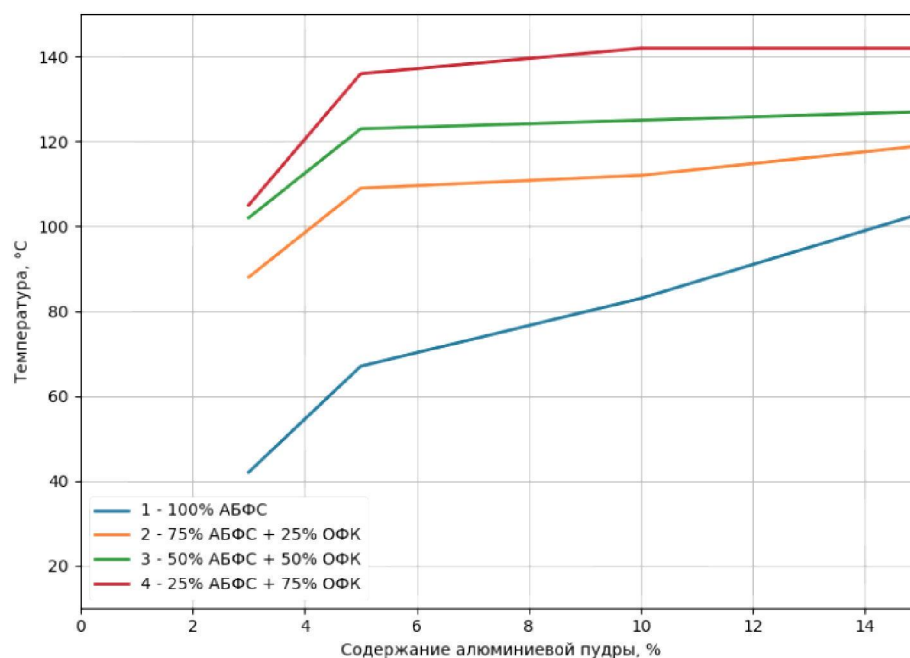


Рисунок 3.4 – температура взаимодействия фосфатного связующего с алюминиевой пудрой ПАП-1: 1 – 100% АБФС; 2 – 75%АБФС+25% ОФК;
3 – 50%АБФС+50%ОФК; 4 – 25%АБФС+75%ОФК

Особое значение в работе придавалось оптимизации содержания алюминиевого порошка как критического параметра, определяющего как технологические характеристики процесса, так и конечные свойства материала. Экспериментально установлено, что при содержании алюминия менее 3% реакция протекает недостаточно интенсивно - смесь сохраняет избыточную текучесть и не достигает необходимой степени отверждения. Напротив, превышение 9%-ного порога приводит к нежелательным эффектам - локальному комкованию смеси, формированию чрезмерно развитой пористой структуры и, как следствие, снижению прочностных характеристик отвержденного материала. Полученные результаты наглядно демонстрируют возможность целенаправленного управления процессом структурообразования поризованных композиций за счет регулирования трех основных факторов: выбора типа и состава связующего компонента, оптимизации содержания алюминиевого порошка и введения кислотных модификаторов. Эти выводы позволили установить необходимое содержание алюминия в составесмеси на 6% с целью получения стабильного результата.

Проведенные эксперименты продемонстрировали, что разработанные композиционные смеси способны в процессе реакции достигать температуры 115°C, рисунок 3.1, что подтверждает возможность эффективного использования алюминиевого порошка марки ПОС-15 совместно с АБФС для создания жаростойких составов. Особое значение имеет достижение критического температурного порога в 100°C, при котором активизируются следующие последовательные процессы: активная дегидратация системы, уплотнение композиционной структуры, последующее отверждение, формирование устойчивой микроструктуры и набор эксплуатационной прочности готового материала.

Полученные результаты имеют значительную технологическую ценность, поскольку позволяют: оптимизировать состав композиций, контролировать

параметры процесса отверждения, прогнозировать свойства конечного продукта и разрабатывать энергоэффективные технологии производства жаростойких материалов. Эти данные открывают новые перспективы для создания композиционных материалов с заданными свойствами, способных к самостоятельному отверждению без применения традиционных энергоемких процессов термообработки, что существенно расширяет возможности их промышленного применения.

Проведенные исследования убедительно доказали, что регулирование температуры исходных компонентов смеси является эффективным инструментом управления процессом формирования высокотемпературных фосфатных композиций. Данный подход создает принципиально новые возможности для направленного контроля структуры жаростойких поризованных материалов.

Полученные результаты выявили четкую взаимосвязь между начальной температурой компонентов, кинетикой структурообразования и пористостью конечного материала. В процессе исследований были определены три критических температурных диапазона: от 60 до 80 °С (активация газообразования), от 100 до 120 °С (начало поликонденсации) и от 150 до 180 °С (завершение структурообразования). Установлены оптимальные параметры получения материала: температура смешения 20 °С, время первичного отверждения от 40 до 60 минут, максимальная температура саморазогрева от 110 до 115 °С.

Важным практическим результатом работы стала возможность создания материалов с регулируемыми характеристиками пористости (55-85%) и прочности (5-15 МПа) без необходимости применения энергозатратных процессов внешнего нагрева. Это открывает перспективы для разработки экономичных технологий производства жаростойких материалов с заданными свойствами.

Согласно данным предыдущих исследований [15, 70, 84, 105], традиционно используемые в качестве газообразователей алюминиевые пудры марок ПАП-1 и ПОС-15, несмотря на способность обеспечивать нагрев системы до 140 °С, демонстрируют чрезмерно высокую скорость реакции с фосфатными связующими при стандартных условиях (до 20 °С), что подтверждается результатами,

представленными на рисунке 3.2. Проведенный сравнительный анализ кинетических характеристик выявил принципиальные различия в поведении различных алюминиевых добавок: в то время как реакция с алюминиевой пудрой протекает с чрезмерной интенсивностью, взаимодействие с порошком ПОС-15 характеризуется более умеренной и контролируемой скоростью.

Исходя из информации из открытых источников были выведены графики зависимости термометрических кривых взаимодействия фосфатного связующего (АФС и АБФС) в соотношении 50:50, с алюминиевой пудрой равной 6% (ПАП-1 и ПОС-15). Выбранные средние параметры смесей. Результаты расчетов представлены на рисунке 3.5.

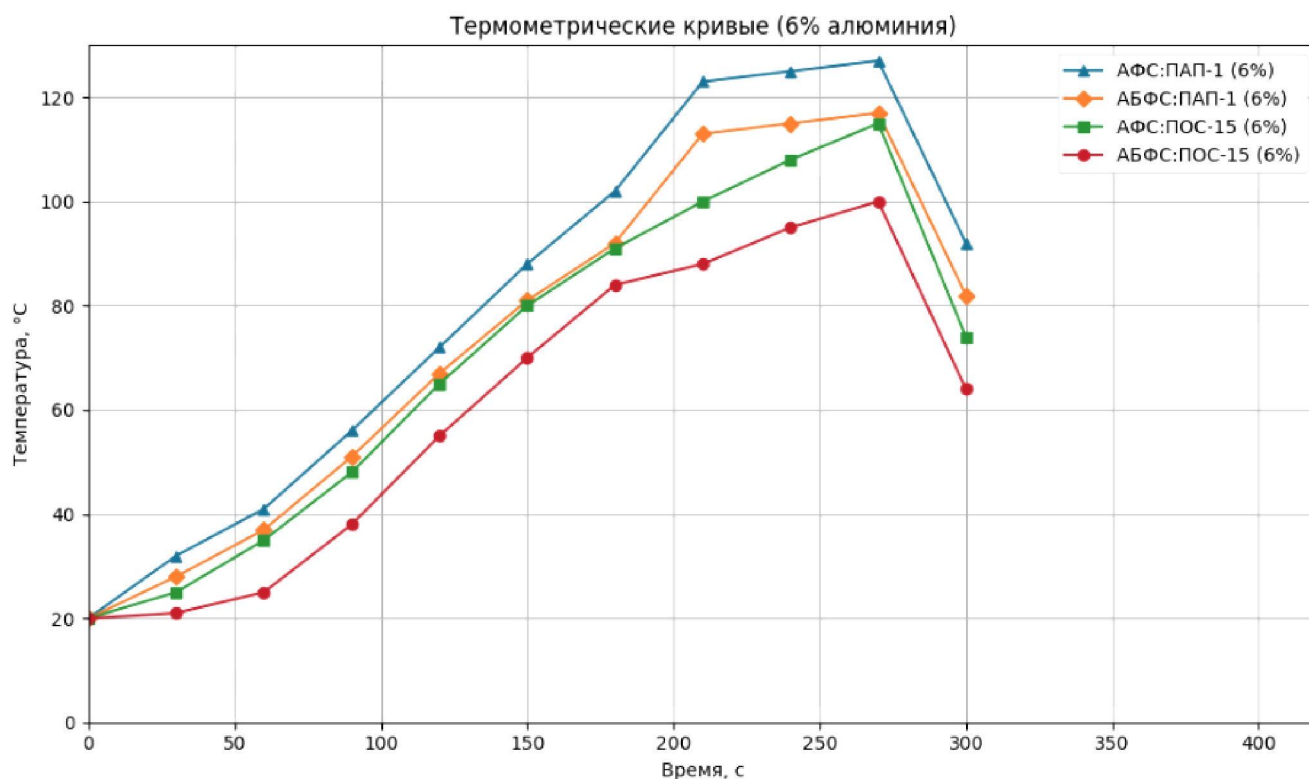


Рисунок 3.5 – термометрические кривые взаимодействия фосфатного связующего АФС и АБФС с алюминиевой пудрой марки ПАП-1 и ПОС-15.

Такие особенности реакционной способности алюминиевой пудры создают существенные технологические ограничения при производстве жаростойких материалов в стандартных условиях (20°C и выше). Основные технологические проблемы включают чрезмерно быстрое газовыделение, вызывающее

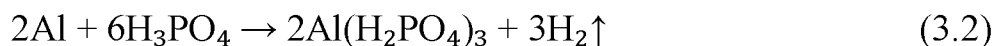
неравномерность пористой структуры, трудности управления процессом вспучивания, неоднородность микроструктуры конечного продукта, а также сложности при масштабировании процесса для промышленного производства.

Алюминиевая пудра ПАП-1 ориентирована на создание легких ячеистых материалов с теплоизоляционными свойствами, тогда как ПОС-15 обеспечивает структурную целостность и огнеупорность в условиях экстремальных температур. АФС и АБФС служат связующими для термостойких матриц, различаясь по составу и стойкости к термическим нагрузкам. Ортофосфорная кислота выступает базовым компонентом для синтеза фосфатных связующих, регулируя их свойства. Комбинирование этих веществ позволяет создавать материалы с оптимальным балансом пористости, прочности и термостойкости, что перспективно для строительной инженерии, энергетики и металлургии.

3.2 Исследование влияния огнеупорных наполнителей на свойства жаростойкого ячеистого материала

Шамот и кремнеграфитовые отходы (КГО) нашли широкое применение в производстве фосфатных жаростойких материалов благодаря их способности формировать легкие, прочные и термически устойчивые структуры. Шамот, представляющий собой обожженную глину с высоким содержанием Al_2O_3 и SiO_2 , используется как тонкомолотый наполнитель и заполнитель, обеспечивая стабильность при температурах до $1600^{\circ}C$, снижая усадку материала и регулируя его пористость за счет варьирования степени измельчения (например, до $2500\text{ см}^2/\text{г}$). Кремнеграфитовые отходы, домолотые до удельной поверхности $2500\text{ см}^2/\text{г}$, играют роль модификатора, повышающего термостойкость за счет высокой теплопроводности графита и химической инертности, а также улучшающего адгезию компонентов и заполняющего мелкопористую структуру. Их оптимальное содержание составляет от 10 до 15 % от массы сухих компонентов, что позволяет снизить плотность без потери прочности.

Алюминиевая пудра ПАП-1 и ПОС-15 выступает газообразователем, обеспечивая пористость материала за счет реакции с ортофосфорной кислотой, формула 3.2:



Эта реакция выделяет водород, формируя равномерные поры. Однако критично соблюдать оптимальные концентрации: при содержании пудры менее 2,5 % смесь не затвердевает без термообработки, а свыше 8 % интенсивное газовыделение нарушает структуру. Оптимальный диапазон — от 2,5 до 8 %, где 3 % пудры дают плотность 800 кг/м³, а 6 % — 600 кг/м³. Для связующего используются АФС и АБФС композиции. Ортофосфорная кислота (50 % от массы связующего) регулирует реакционную способность системы.

Установлено, что максимальная прочность (15–25 МПа) достигается при диапазоне от 10 до 30 % КГО и 6 % пудры, что также обеспечивает термостойкость при 50 циклах нагрева-охлаждения до 1000 °С.

Испытания заключались в изготовлении серии образцов с контролируемым содержанием КГО (10 %, 20 %, 30 % от массы связующего). Основой служил алюмоборфосфатный связующий раствор АБФС:ОФК=50:50, приготовленный путем смешивания твердого связующего ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot \text{P}_2\text{O}_5 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) с водой в соотношении 3:1. В качестве газообразующего компонента использовали алюминиевый порошок ПОС-15 (6 % от массы АБФС), обеспечивающий порообразование за счет реакции с фосфатным связующим. КГО добавляли в виде порошка с размером частиц от 50 до 150 мкм, предварительно просеянного через сито для удаления крупных фракций. Компоненты тщательно перемешивали в планетарной мешалке в течение 5 минут до получения однородной массы, после чего заливали в силиконовые формы с размерами ячеек 5×5×5 см. Образцы твердели при комнатной температуре в течение 24 часов.

При добавлении 10 % КГО плотность стала равна 804 кг/м³ прочность снизилась до 1,7 Мпа. При 20 % КГО плотность достигла максимального значения 832

кг/м³, прочность упала до 1,2 МПа. При 30 % КГО плотность немного снизилась до 806 кг/м³, прочность продолжила падать до 0,8 МПа. Это связано с:

Агрегацией частиц: Избыточное количество КГО вызывает образование крупных агрегатов, служащих концентраторами напряжений.

Нарушением гомогенности: Высокая пористость и слабая адгезия между КГО и матрицей приводят к локализованному разрушению структуры под нагрузкой.

Прочность при сжатии снижалась с увеличением доли КГО. При 10 % прочность снизилась на 15 % , при 20 % — на 40 % , а при 30 % — на 60 % . Это связано с нарушением однородности матрицы, образованием слабых зон вокруг крупных частиц КГО и ухудшением адгезии между компонентами.

Несмотря на снижение прочности, добавление КГО положительно сказалось на термостойкости материала. Высокая теплопроводность графита и химическая инертность SiO₂, входящие в состав КГО, способствовали повышению устойчивости к высокотемпературным воздействиям. Зависимость плотности и термостойкости полученного материала от содержания КГО представлена в таблице 3.4, а графическая интерпретация результатов на рисунке 3.6

Таблица 3.4 – зависимость показателей исследования для АБФС и ПОС-15

Добавка КГО, %	Плотность, кг/м ³	Прочность, МПа.	Термическая стойкость, возд. теплосмены	Расход связующего л/кг	Огнеупорность, °С
10	804	1,7	27	0.23	1800
20	832	1,2	34	0.20	1753
30	806	0,8	37	0.20	1620

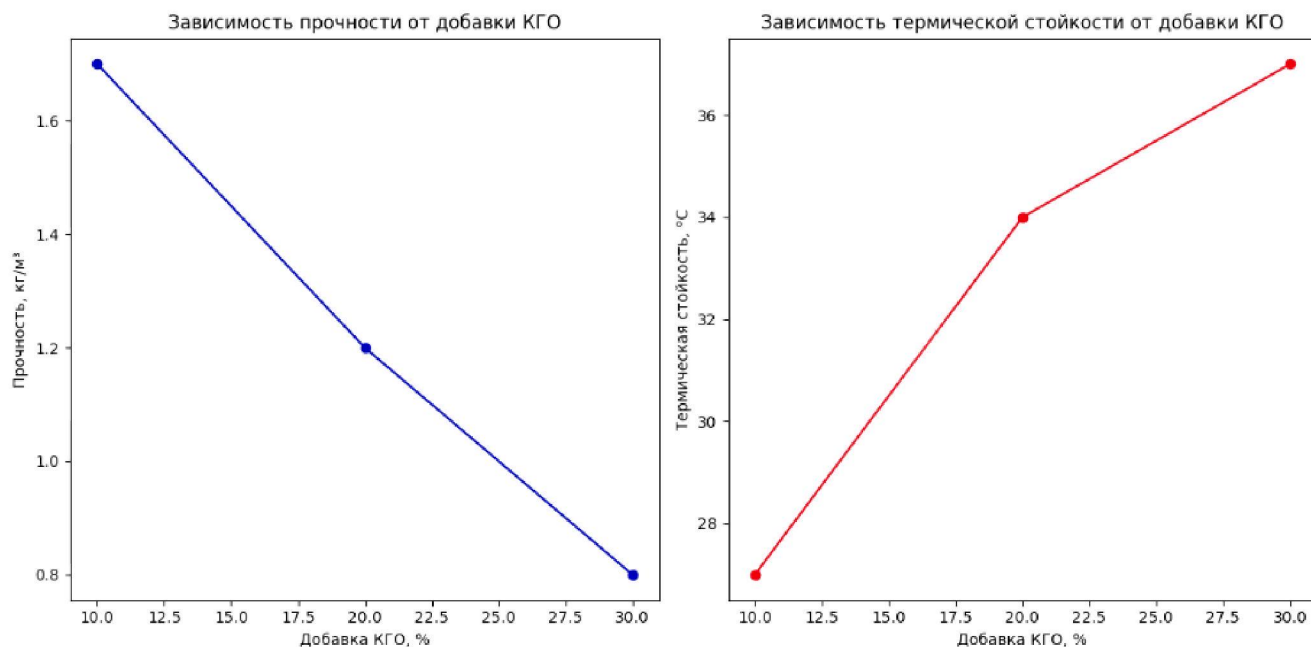


Рисунок 3.6 – Зависимость прочности и термической стойкости от содержания КГО

При добавлении КГО в количестве 10 % к составу жаростойкого поризованного бетона, при использовании алюминиевого порошка в диапазоне 4–8% и фосфатного связующего в пределах от 0,2 до 0,26 л/кг, возможно создание материалов с плотностью от 600 до 900 кг/м³. Однако достижение минимальной плотности 600 кг/м³ требует увеличения дозировки газообразователя и связующего, что повышает себестоимость и делает такой подход экономически невыгодным. При снижении объема алюминиевого порошка при неизменном количестве связующего или уменьшении расхода связующего при фиксированной доле алюминия наблюдается постепенное увеличение плотности материала.

Увеличение содержания КГО до 20 % при тех же параметрах дозировки связующего и алюминиевого порошка не позволяет получить бетон с плотностью 600 кг/м³, но расширяет диапазон рецептур, при которых формируется материал с плотностью около 900 кг/м³. Анализ графиков показывает, что при постоянных пропорциях связующего и алюминиевого порошка рост доли КГО приводит к термической стойкости поризованных материалов. При содержании отходов 30 % плотность материала, падает обратно до 806 кг/м³.

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы проведено комплексное исследование ячеистых жаростойких материалов на основе фосфатных связующих, включая изучение составов, технологий и свойств, обеспечивающих высокую термическую стабильность и эксплуатационные характеристики. Цель работы — разработка материалов с регулируемыми параметрами пористости (от 55 до 85 %) и прочности (от 5 до 15 МПа) без необходимости энергоемких этапов термообработки — достигнута за счет оптимизации соотношения компонентов, включая алюминиевый порошок (от 3 до 9 % от массы связующего), фосфатные системы (АФС, АБФС, ОФК) и наполнители (шамотный порошок, кремнеграфитовые отходы).

Неправильная форма огнеупорных наполнителей позволяет увеличить прочность итогового материала за счет увеличения межзерновой границы между наполнителем и остальным телом матрицы системы.

Опытным путем установлено что при использовании алюмофосфатного и алюмоборфосфатного связующего при соотношении 50:50 происходит самостоятельное отверждение смеси без дополнительной термической обработки. При меньшем содержании АФС смесь не в состоянии держать форму и слишком интенсивном нагреве что затрудняло контроль реакции. При 25 % АФС температура взаимодействия поднималась до 130 °С, что требовало большего времени на охлаждение, а это в свою очередь влекло деформацию заданной формы смеси.

Оптимальное содержание алюминиевого порошка равна 6 %. При повышении содержания до 9% реакция выделения водорода происходит очень бурно и не позволяет ее контролировать для получения необходимой пористости итогового материала. При концентрации алюминиевого порошка менее 6 % невозможно гарантировать однородность пористого материала. Частицы алюминия занимают не весь объем смеси, что влечет за собой нарушение целостности пористой структуры ячеистого материала.

Алюминиевый порошок марки ПОС-15 позволяет получить легкий ячеистый материал. При смешивании алюминия с наполнителем можно получить огнеупорный материал для эксплуатации в условиях экстремальных температур, до 1800 °С. Реакция протекает на приемлемых температурах, порядка от 95 до 105 °С.

В свою очередь, алюминиевая пудра ПАП-1 ориентирована на создание легких ячеистых материалов с высокими теплоизоляционными свойствами, до 900 °С, но высокая температура реакции, от 110 до 120 °С затрудняет контроль за результатом.

Экспериментально установлено АБФС и алюминиевого порошка ПОС-15 с использованием наполнителя в виде кремнеграфитовых отходов, позволяет получать материалы с температурой применения до 1600–1800 °С, прочностью при сжатии 0,8 МПа. Применение отходов снижает стоимость производства и решает экологические задачи утилизации. Добавление кремнеграфитовых отходов до 30% обеспечивает плотность материала от 600 до 900 кг/м³, сохраняя термостойкость в диапазоне от 10 до 35 воздушных теплосмен.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются создание «умных» материалов с адаптивными свойствами, внедрение нанокompозитных структур и развитие компьютерного моделирования процессов структурообразования. Также актуальна разработка экологически безопасных технологий, минимизирующих выбросы и использующих вторичные ресурсы. Результаты работы вносят вклад в развитие материаловедения, расширяя возможности применения жаростойких материалов в металлургии, авиакосмической промышленности и энергетике, где требуются конструкции с высокой термостойкостью и низкой теплопроводностью.

Таким образом, проведенные исследования подтверждают эффективность фосфатных связующих для создания ячеистых жаростойких материалов с заданными свойствами, а также обосновывают их конкурентоспособность за счет сочетания технологичности, экономичности и экологической устойчивости.

Список используемых источников

- 1 **Фосфатные связующие: типы, свойства, области применения** [Электронный ресурс]: статья / [сайт] URL <https://studfile.net/preview/7637155/page:15/> (дата обращения: 24.04.2025).
- 2 **Алюмохромфосфатные связующие** [Электронный ресурс]: статья / [сайт] URL <https://www.chem21.info/info/946466/> (дата обращения: 26.04.2025).
- 3 **Авакян, А. Г. Жаростойкий фосфатный газобетон с добавками кремнеграфитовых отходов** [Текст]: дис. канд. тех. наук: 05.23.05: защищена 06.06.88: утв. 01.09.88 / Авакян Арсен Гайкович. – Днепропетровск, 1988. – 181 с.
- 4 ГОСТ 4385-68 «Изделия огнеупорные. Классификация. — М.: Издательство стандартов, Москва, 1968. — 10 с.
- 5 **ГОСТ 25485-2019 «Бетоны ячеистые. Общие технические условия».** — М.: Стандартинформ, 2019. — 19 с.
- 6 **Абызов, А. Н. Жаростойкий бетон на вяжущем из металлургических известково-магнезиальных глиноземистых шлаков** [Текст]: дис. канд. тех. наук: 05.23.05: защищена 15.04.73: утв. 10.08.73 / Абызов Александр Николаевич – Москва, 1973. – 189 с.
- 7 **Жаростойкие бетоны с добавками отходов производства носителя катализатора дегидрирования углеводородов** [Текст]: учебное пособие / А. Н. Абызов, В. А. Абызов, А. К. Абрамов, В. К. Печериченко – Москва: Строительные материалы, 2007. – 84 – 85 с.
- 8 **Кириянова, Л. А. Легкие ячеистые и поризованные жаростойкие бетоны на фосфатном вяжущем** [Текст]: дис. канд. тех. наук: 05.23.05: защищена 16.06.1980: утв. 07.09.1980 / Кириянова Любовь Арсентьевна. – Москва, 1980. – 198 с.
- 9 **Теплоизоляционный материал фосфатного твердения на основе отходов производства синтетического каучука** [Текст]: сборник научных трудов / А. Н. Абызов – Челябинск: УралНИИИстромпроект, 1976. – 105 – 107 с.

- 10 **Александрова, Г.Н. Высокоогнеупорный бетон на алюмофосфатной связке** [Текст]: дис. канд. тех. наук: 05.23.05: защищена 06.11.69: утв. 01.02.69 / Александрова Галина Николаевна. – Москва, 1969. – 177 с.
- 11 **Алюмосиликатные энерго- и ресурсосберегающие огнеупорные изделия** [Текст]: учебное пособие / Р. В. Зубашенко Некрасов – Москва: Новые огнеупоры, 2011. – 147 – 150 с.
- 12 **Жаростойкие бетоны на основе алюминотермических шлаков ОАО «Ключевский завод ферросплавов»** [Текст]: учебное пособие / А. Н. Абызов, В. А. Перепелицын, В. М. Рывин, В. Г. Игнатенко, О. А. Клинов – Москва: Новые огнеупоры, 2007. – 15 – 18 с.
- 13 **Состояние и перспективы развития научных исследований и применения жаростойких бетонов** [Текст]: учебное пособие / К. Д. Некрасов – Москва: Стройиздат, 1981. – 14-31 с.
- 14 **Шипулин, В. И. Жаростойкие бетоны на основе отходов производства синтетического каучука** [Текст]: дис. канд. тех. наук: 05.23.05: защищена 16.01.1987: утв. 29.06.1987 / Шипулин Валерий Иванович. – Москва, 1987. – 233 с.
- 15 **Технология изготовления жаростойких бетонов** [Текст]: Справочное пособие к СНиП. – Москва: Стройиздат, 1991. – 65 с
- 16 **Задорожный, И. В. Разработка термостойких композиционных материалов на основе карбида кремния** [Текст]: дис. канд. тех. наук: 05.16.06: защищена 05.04.2009: утв. 10.08.2009 / Задорожный Игорь Валерьевич. – Москва, 2009. – 212 с.
- 17 **Бетоны жаростойкие. Технические условия** [Текст]: ГОСТ 20910-2019 (ИСО 6318-93). Введ. 2019.09.01. – Москва: Изд-во стандартов, 2019 – 9 с.
- 18 **Огнеупоры. Стационарный метод определения коэффициента теплопроводности** [Текст]: ГОСТ 12170-2021 (ИСО 3166-97). Введ. 2021.11.01. – Москва: Изд-во стандартов, 2021 – 20 с.

- 19 **Огнеупоры и огнеупорное сырье. Методы определения огнеупорности** [Текст]: ГОСТ 4069-2020 (ИСО 004-97). Введ. 2021.03.01. – Москва: Изд-во стандартов, 2021 – 11 с.
- 20 **Изделия огнеупорные теплоизоляционные. Метод определения предела прочности при сжатии при комнатной температуре** [Текст]: ГОСТ 4071.2-2021 (ИСО 8895-86). – Москва: Изд-во стандартов, 2022 – 12 с.
- 21 **Огнеупоры и огнеупорное сырье. Методы определения истинной плотности** [Текст]: ГОСТ 2211-2021 (ИСО 5018-83). Введ. 2021.03.01. – Москва: Изд-во стандартов, 2021 – 7 с.
- 22 **Получение пористых керамических материалов на основе волластонита с использованием кремнийсодержащих компонентов** [Текст]: учебное пособие / А. Т. Волочко. К. Б. Подболотов. А. А. Жукова – Москва: Новые огнеупоры, 2011. – 24 – 30 с.
- 23 **Абызов В. А. Разработка фосфатного связующего для жаростойкого газобетона** [Текст] / В. А. Абызов // Физико-химия и технология оксидно-силикатных материалов: Вестник УГТУ, № 1. - Екатеринбург: УГТУ, 2000. - С. 105 - 107.
- 24 **Абызов В. А. Ячеистые жаростойкие материалы на основе промышленных отходов** / В. А. Абызов // Строительство и образование: сб. науч. трудов. – Екатеринбург: УГТУ, 2001. – Вып. 4. С. 123-124.
- 25 **Абызов В. А. Выбор рациональных областей применения промышленных отходов в технологии жаростойкого бетона** / В. А. Абызов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – Серия «Строительство и архитектура». – Вып. 7. – Челябинск: ЮУрГУ, 2008. - №25(125). – С. 37-39.
- 26 **Абызов В. А. Вяжущие, клеи и жаростойкие бетоны с использованием дисперсных с использованием дисперсных высокоглиноземистых промышленных отходов** / В. А. Абызов // Огнеупоры и техническая керамика. – 2008. - №9. – С. 40-44.

- 27 **Абызов В. А. Особенности гидратации высокоглиноземистых цементов из шлаков алюминотермического производства с добавками суперпластификаторов / В. А. Абызов // Огнеупоры и техническая керамика. – 2009. - №4-5. – С. 80-84.**
- 28 **Абызов В. А. Жаростойкие бетоны на глиноземистых цементах с тонкомолотыми добавками промышленных отходов [Текст] / В. А. Абызов, А. К. Абрамов, В. М. Рытвин // Огнеупоры и техническая керамика. – 2010 – №11/12. – С. 43 - 47.**
- 29 **Абызов В.А. Ячеистые жаростойкие бетоны на фосфатном вяжущем и заполнителях из кремнеграфитовых и алюмохромсодержащих промышленных отходов [Текст] / В. А. Абызов, Ч. Г. Пак, В. М. Батрашов // Огнеупоры и техническая керамика. – 2011 – №11/12. – С. 27 - 29.**
- 30 **Авакян А. Г. Жаростойкий фосфатный газобетон с добавками кремнеграфитовых отходов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Днепропетровск, 1988. -18 с.**
- 31 **Александрова Г. Н. Высокоогнеупорный бетон на алюмофосфатной связке: автореф. дис ... канд. техн. наук. - М., 1968. - 17 с.**
- 32 **Александрова Г. Н. Жаростойкие бетоны на фосфатных связках (обзор) [Текст] / Г. Н. Александрова - М.: ЦИНИС, 1971. - 30 с.**
- 33 **А.с. СССР №300439, М. Кл С 04b 21/01. Способ приготовления газообразователя / А. Н.Чернов, А. Н. Абызов // Открытия. Изобретения. - 1971, № 13.**
- 34 **А.с. СССР №353925, М. Кл С 04b 29/00. Способ приготовления изделий на основе алюмофосфатного вяжущего / А. Н. Чернов, А. Н. Абызов // Открытия. Изобретения. - 1972, № 30.**
- 35 **А.с. СССР №414218, МКИ С 04b 21/02. Сырьевая смесь для изготовления жаростойкого газобетона / К. Д. Некрасов, А. Е. Шейкин, А. П. Тарасова, М. Я. Кривицкий, А. Е. Федоров, А. А. Блюсин, А. Л. Карпова, Г. П. Евдеева // Открытия. Изобретения. - 1974, № 5. - С. 78.**

- 36 ГОСТ 10180-90 «Методы определения прочности по контрольным образцам». — М.: Стандартинформ, 1990. — 35 с.
- 37 ГОСТ 12730.0-78 «Бетоны. Общие требования к методам определения плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости». — М.: Стандартинформ, 1978. — 3 с.
- 38 ГОСТ 12730.1-78 «Бетоны. Методы определения плотности». — М.: Стандартинформ, 1978. — 8 с.
- 39 ГОСТ 4069-69 «Изделия и материалы огнеупорные. Методы определения огнеупорности» — М.: Стандартинформ, 1969. — 16 с.
- 40 ГОСТ 10678-78 «Кислота ортофосфорная термическая. Технические условия». — М.: Стандартинформ, 1978. — 30 с.
- 41 ГОСТ 6552-80 «Кислота ортофосфорная. Технические условия». — М.: Стандартинформ, 1978. — 8 с.
- 42 ГОСТ 24211-91 «Добавки для бетонов. Общие технические требования». — М.: Стандартинформ, 1991. — 19 с.
- 43 ГОСТ 5949-18 «Металлопродукция из сталей и нержавеющей и сплавов на железоникелевой основе коррозионно-стойких, жаростойких и жаропрочных». — М.: Стандартинформ, 2018. — 35 с.



Министерство образования и науки РФ

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

Кафедра « Сварочное, литейное производство и материаловедение »

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

«Изучение технологических параметров ячеистых жаростойких материалов на фосфатном связующем»

Выполнил: ст. гр. 21MT1 Толубай уулу Н.

Руководитель: к.т.н. доцент, Крюков Д.Б.

Пенза, 2025 г.

Цель: исследование технологических параметров ячеистых жаростойких материалов на фосфатном связующем.

Задачи:

- Изучить классификацию жаростойких материалов и технологию их производства.
- Выбрать исходные материалы и оборудование, необходимых для проведения исследований.
- Исследовать взаимодействие порошка алюминия и фосфатного связующего.
- Исследовать влияние огнеупорных наполнителей на получаемый материал.

Объектом исследования ячеистые жаростойкие материалы на основе фосфатных связующих, а **предмет исследования** – свойства, состав и технологии получения жаростойких материалов на фос-фатных связующих.

- Высокая потребность в материалах с термостойкостью до 1600–1800°C в металлургии, авиастроении, энергетике.
- Использование промышленных отходов (шлаки, зола ТЭС) для снижения себестоимости и экологических рисков.



23 ноября 2009 г. вступил в силу ФЗ № 261 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»

Классификация жаростойких материалов

Химико-минералогический состав:

- Кремнеземистые
- Алюмосиликатные
- Магнезиальные
- Хромистые
- Углеродистые
- Цирконистые
- Оксидные
- Карбидные
- Нитридные

Типу применяемого связующего:

- Портландцемент
- Жидкое стекло
- Коллоидные кремнеземистые связки
- Фосфатные связки



Виды:

- Хромофосфатное
- Магнийфосфатные
- Кальцийфосфатные.
- Железофосфатные
- Алумохромфосфатное
- Натрийхромфосфатные
- Магнийхромфосфатные.
- Алумоборфосфатное
- Алумосиликофосфатное

Рассматриваемые в работе:

Алюмофосфатные связующие (АФС) :

Преимущества : высокая термостойкость (до 1600°C), прочность при сжатии (до 5,2 МПа).

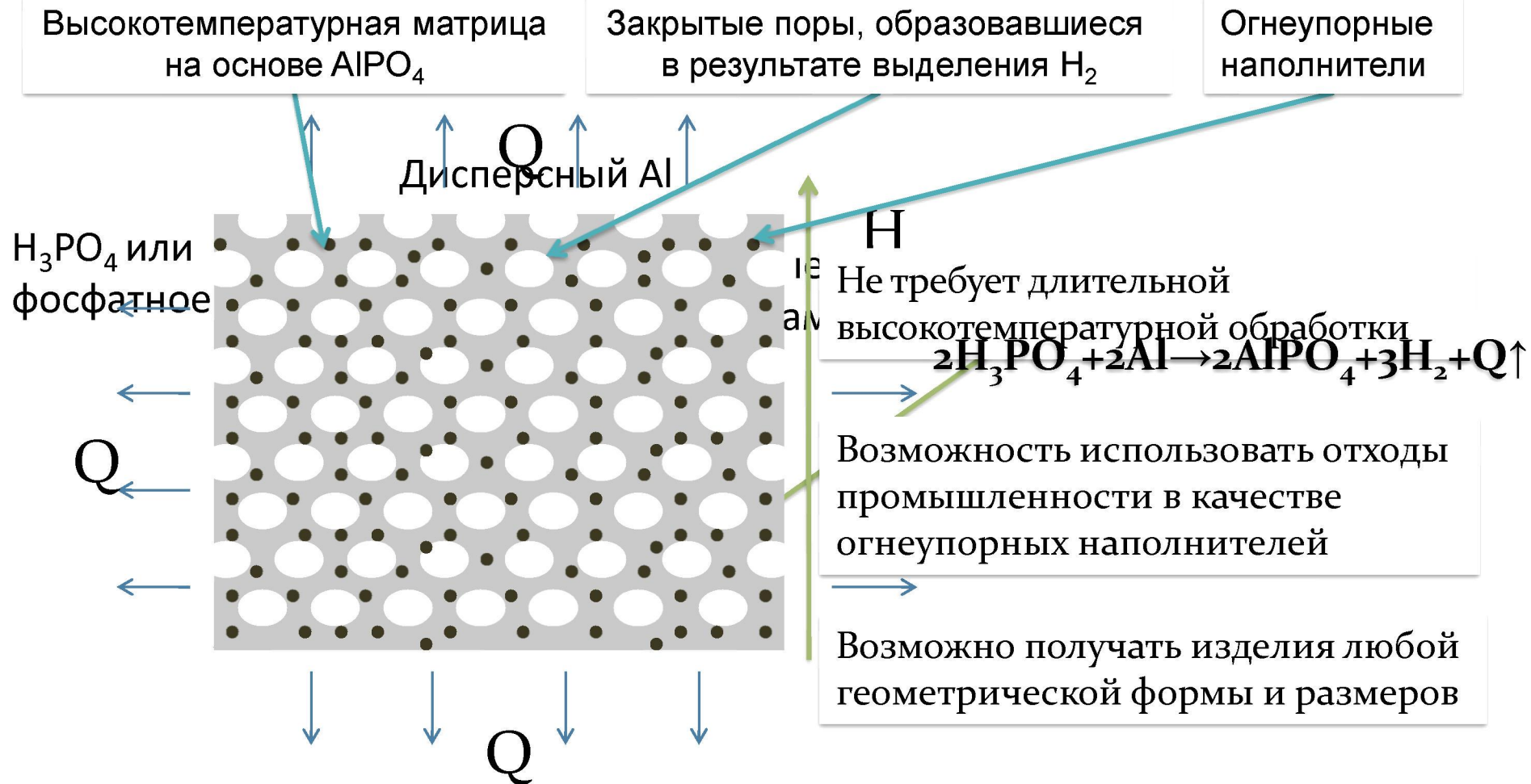
Недостатки: хрупкость, сложность контроля пористости.

Алюмоборфосфатные связующие (АБФС) :

Преимущества: улучшенная адгезия с наполнителями, устойчивость к многократным тепловым ударам.

Недостатки: высокая стоимость борсодержащих компонентов

Схема получения жаростойкого композиционного материала



Выбор исходных материалов

Основной функцией ПАП-1 и ПОС-15 в составе композиции выступает газообразующая способность, обусловленная ее химическим взаимодействием с кислой средой фосфатного связующего

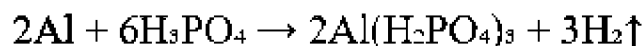
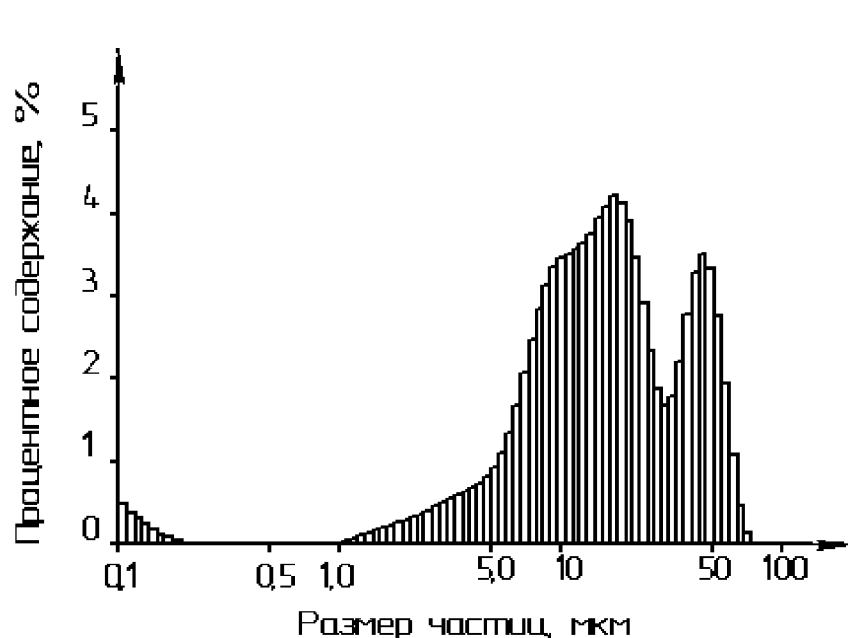


Рисунок 2 - дисперсный анализ частиц
алюминиевой пудры ПАП-1

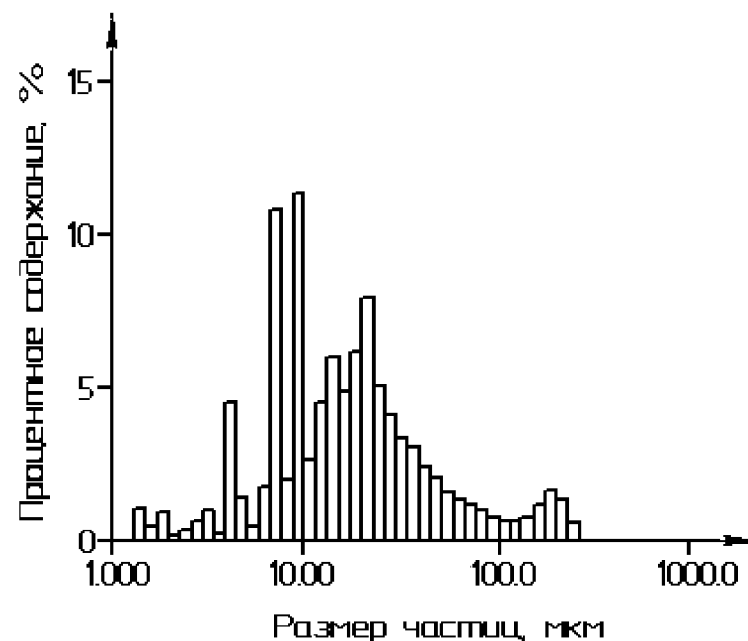


Рисунок 3- диаграмма распределения частиц
порошка алюминия ПОС-15, после
ультразвуковой обработки

Тонкомолотая добавка	Содержание, %										
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Собщ	K ₂ O	Na ₂ O	п.п.п.*
Шамот	38,40	57,20	-	0,62	0,85	0,43	2,50	-	-	-	-
Кремнеграфито- вые отходы	18,50	62,80	-	-	-	-	-	26,70	-	-	18,60

Примечание - * потери при прокаливании.

Характеристика	Шамотный порошок	Кремнеграфитовые отходы
Средняя плотность, г/см ³	2.2–2.5	1.8–2.2
Прочность при сжатии, МПа	25–35	15–25
Огнеупорность, °С	1580–1700	2200–2800
Термостабильность	Высокая	Очень высокая

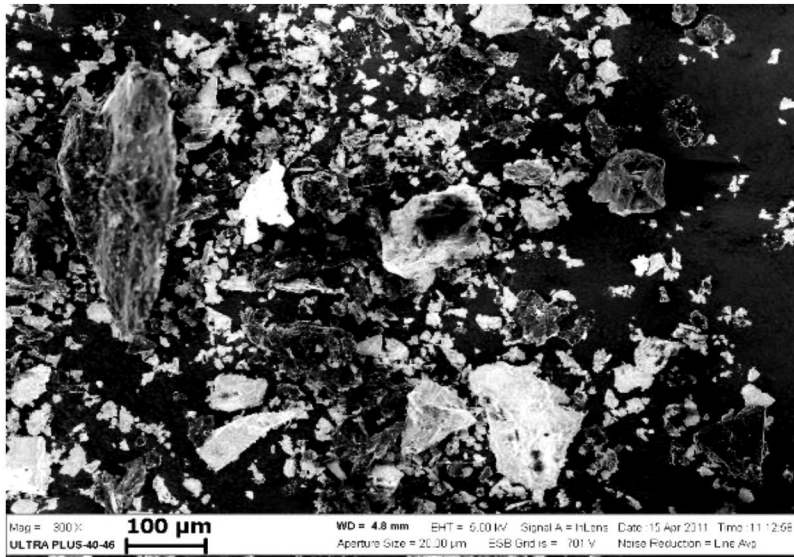


Рисунок 1 - электронные фотографии порошка отходов кремнеграфитовых тиглей

Оборудования для исследования



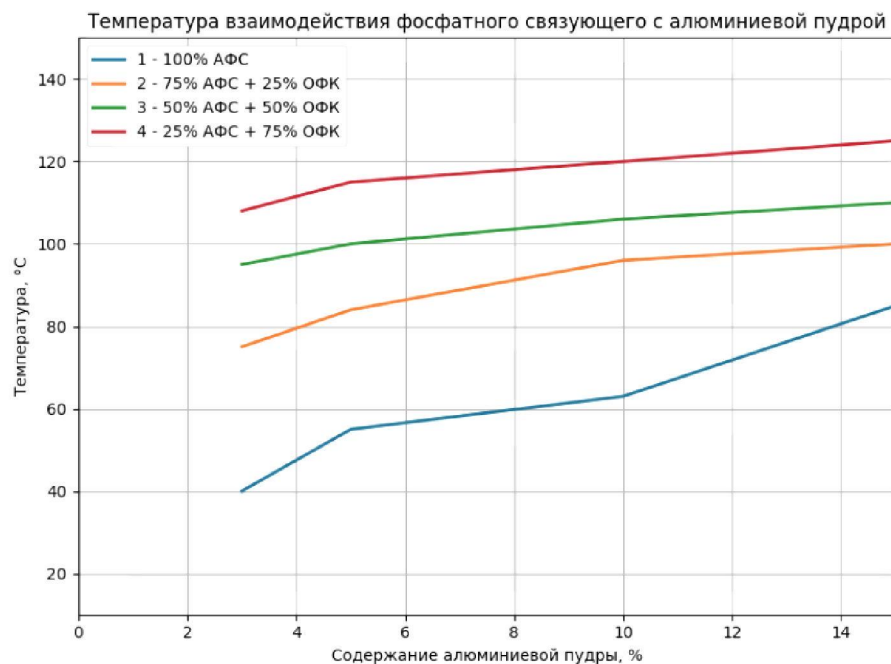
Рисунок 4 - лабораторные весы BM213



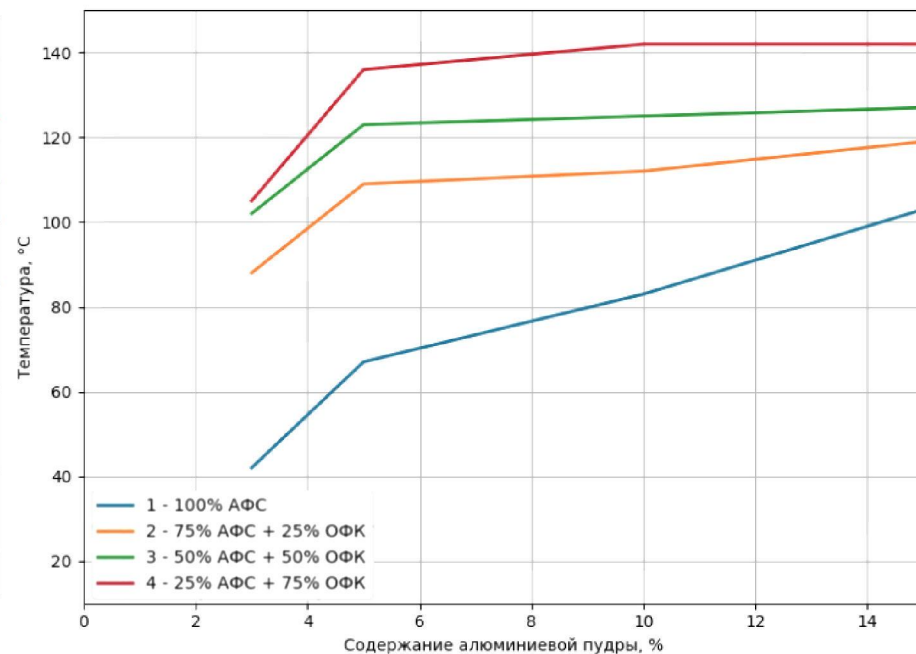
Рисунок 5 - разрывная машина
ИР5145-500



Рисунок 6 - высокотемпературная муфельная печь СНОЛ 12/16



ПОС-15

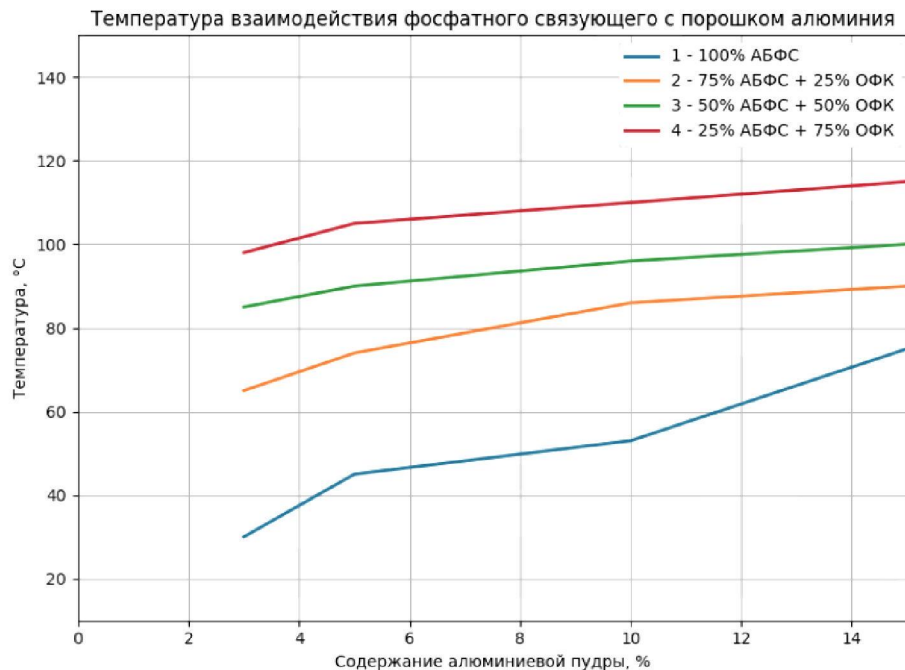


ПАП-1

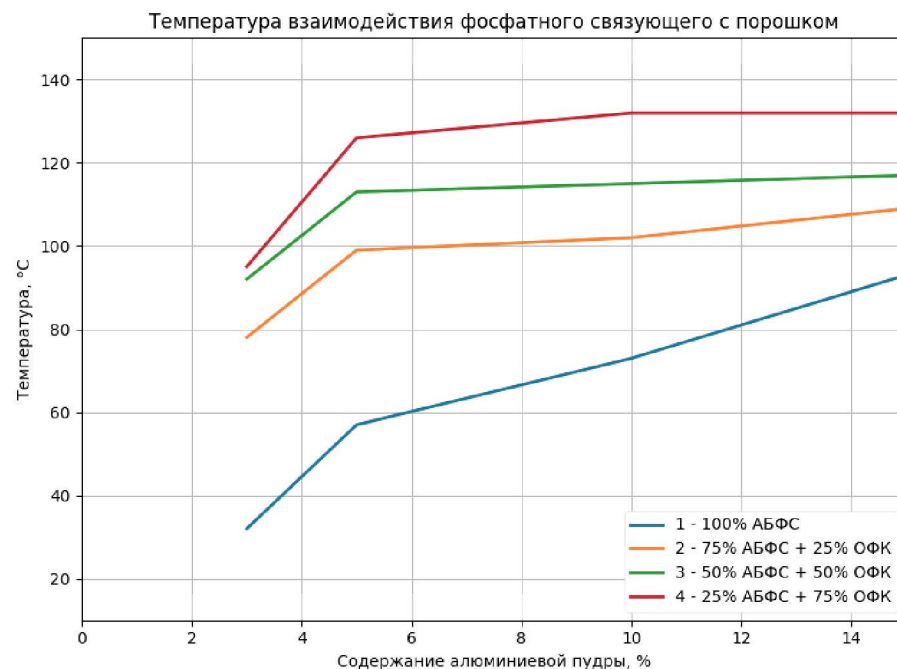
Рисунок 7 - температура взаимодействия фосфатного связующего с алюминиевой пудрой:

1 – 100% АФС; 2 – 75%АФС+25% ОФК;
3 – 50%АФС+50%ОФК; 4 – 25%АФС+75%ОФК

Взаимодействие газообразователей со связующими



ПОС-15



ПАП-1

Рисунок 8 - температура взаимодействия фосфатного связующего с алюминиевой пудрой:

1 – 100% АБФС; 2 – 75%АБФС+25% ОФК;
3 – 50%АБФС+50%ОФК; 4 – 25%АБФС+75%ОФК

Взаимодействие фосфатного связующего в соотношении 50:50 с алюминиевой пудрой равной 6%

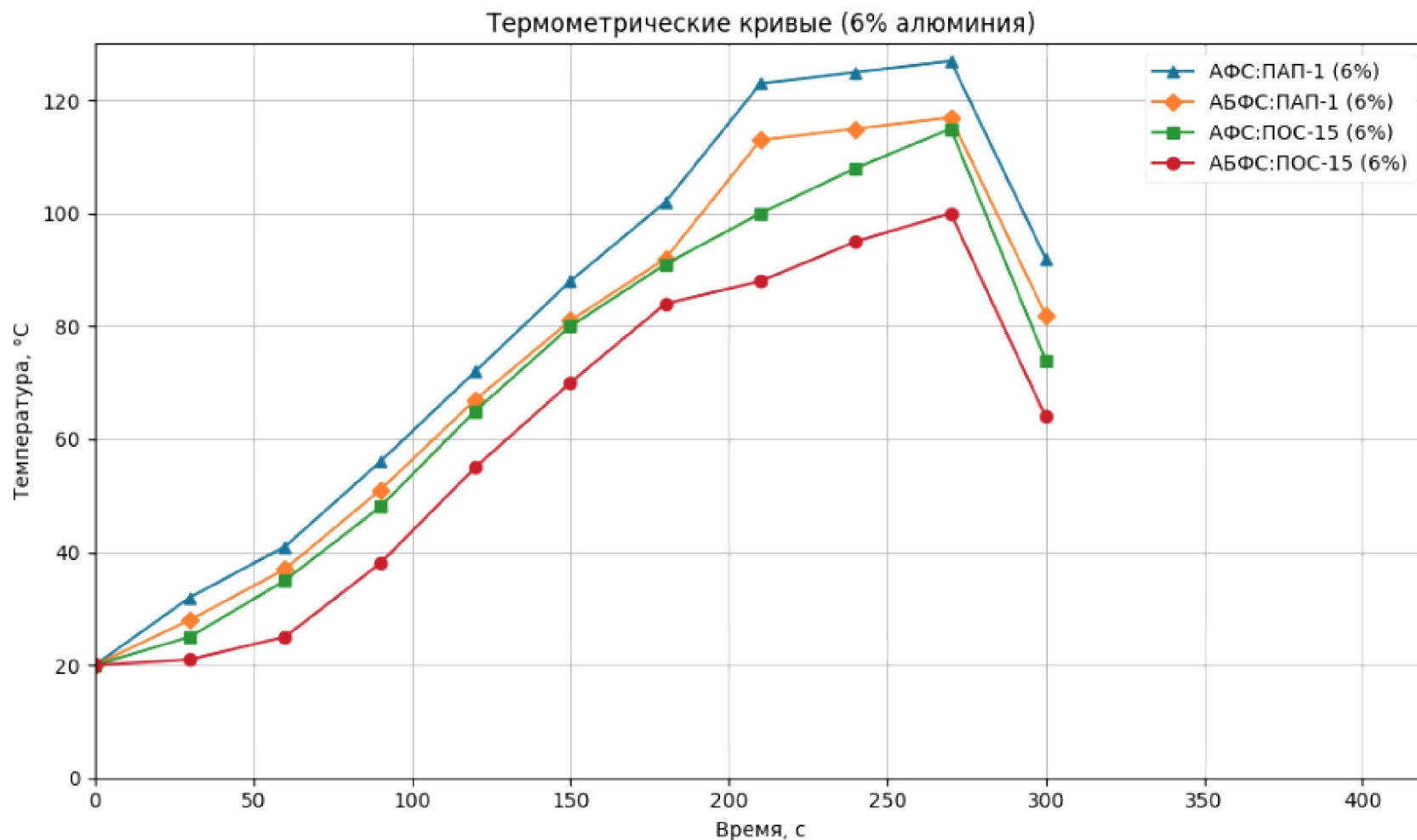


Рисунок 9 - термометрические кривые взаимодействия фосфатного связующего АФС и АБФС с 6%-ой алюминиевой пудрой марки ПАП-1 и ПОС-15

Взаимодействие фосфатного связующего в соотношении 50:50 с алюминиевой пудрой равной 6%

Таблица 1 - зависимость показателей исследования для АБФС и ПОС-15

Добавка КГО, %	Плотность, кг/м ³	Прочность, МПа.	Термическая стойкость, возд. теплосмены	Расход связую- щего л/кг	Огнеупор- ность, °С
10	804	1,7	27	0.23	1800
20	832	1,2	34	0.20	1753
30	806	0,8	37	0.20	1620

Несмотря на снижение прочности, добавление КГО положительно сказалось на термостойкости материала. Высокая теплопроводность графита и химическая инертность SiO_2 , входящие в состав КГО, способствовали повышению устойчивости к высокотемпературным воздействиям.

При добавлении кремнеграфитовых отходов в количестве 10% к составу жаростойкого поризованного бетона, при использовании алюминиевого порошка в диапазоне 4–8% и фосфатного связующего в пределах 0,2–0,26 л/кг, возможно создание материалов с плотностью 600–900 кг/м³.

Взаимодействие фосфатного связующего в соотношении 50:50 с алюминиевой пудрой равной 6%

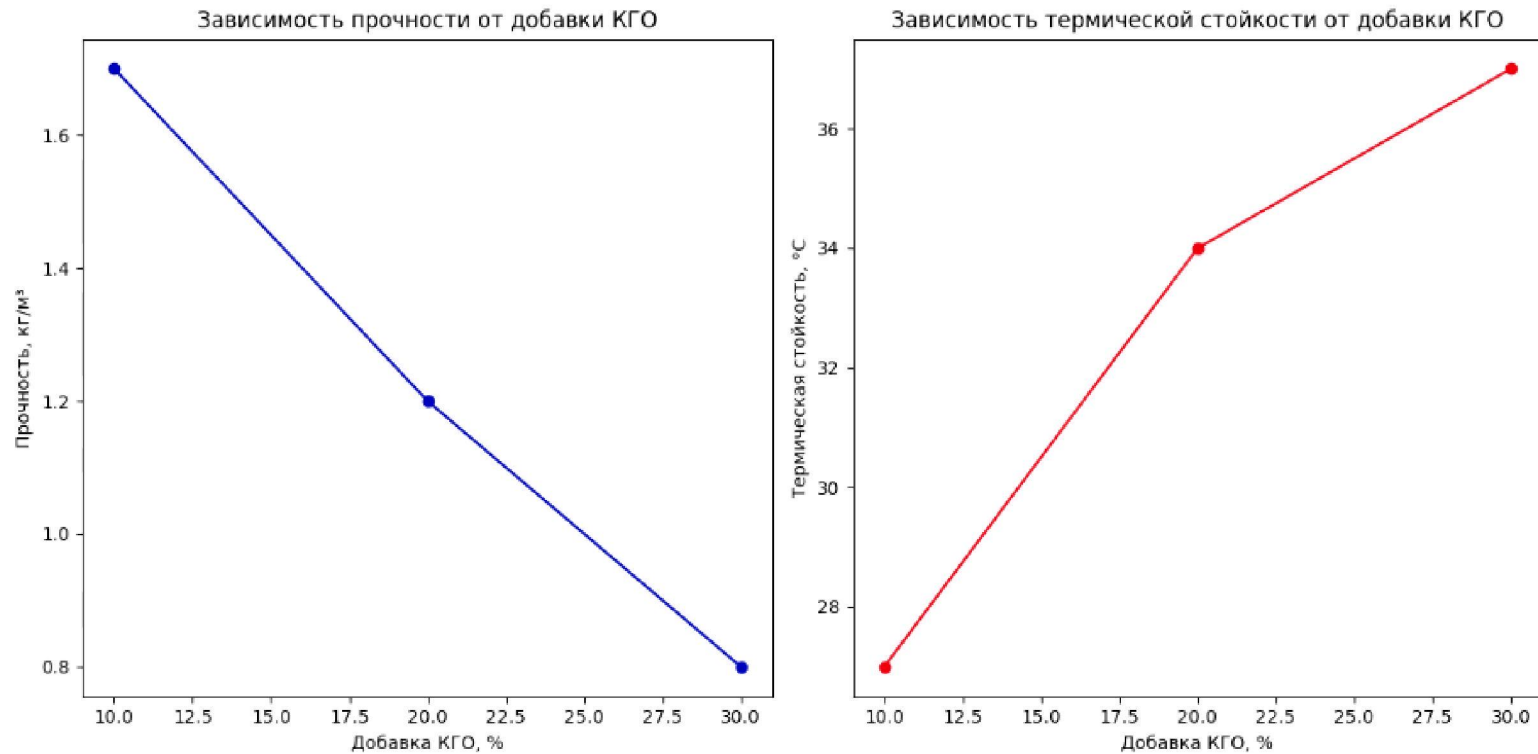


Рисунок 10 – Зависимость прочности и термической стойкости от содержания КГО

Из графиков видно, что при постоянных пропорциях связующего и алюминиевого порошка рост доли КГО приводит к повышению термической стойкости поризованного материала.. Это объясняется наличием повышенного содержания муллита в составе кремнеграфитовых отходов, который обладает повышенной механической и термической стойкостью.

В результате выполнения ВКР рассмотрен жаростойкий ячеистый фосфатный материал, показана перспективность применения, рассмотрены виды фосфатных связующих, произведен выбор исходных материалов, изучены стандартные методы проведения исследований.

Рассмотрена классификация жаростойких материалов в зависимости от химико-минералогического состава. Изучены существующие виды фосфатных связующих и определены оптимальные связки, АФС и АБФС. Представлена модель матрицы составляющая ячеистый материал и представлены преимущества применения кремнеграфитовых отходов в роли огнеупорного наполнителя.

Рассмотрены порошки алюминия ПОС-15 и ПАП-1 и их реакции взаимодействия с ортофосфорной кислотой. При ПОС-15 пиковая температура взаимодействия равна 122 °С. При ПАП-1 пиковая температура взаимодействия равна 140 °С.

Проведены исследования относительно реакции взаимодействия фосфатного связующего в различных концентрациях и алюминиевой пудрой каждой марки.

Оптимальными параметрами считается отношение связующего и ортофосфорной кислоты 50:50, и содержание алюминия 6% от общей массы смеси. При 3% смесь обладает избыточной текучестью и не постигает необходимой степени отверждения. При 9% происходит комкование смеси и формированию чрезмерной пористости, что снижает прочностные характеристики материала.

При добавление КГО, в зависимости от процентного соотношения к общей массе, от 10% до 30%, можно получить следующие характеристики:

Высокая прочность до 1.7 МПа.

Высокая термическая стойкость, до 40 теплосмен.

Высокая рабочая температура до 1800°С.

Плотность до 850 кг/м³.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!