

Школа ИШНПТ
 Направление подготовки 18.04.01 Химическая технология
 ООП Технологии переработки минерального и техногенного сырья
 Специализация Химическая технология керамики и композиционных материалов
 Отделение школы (НОЦ) НОЦ им Н.М. Кижнера

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

Тема работы
Синтез композиций нитрида хрома, нитрида кремния и железа азотированием ферросиликохрома в режиме горения

УДК 547.057:661.8'041'76'28'72

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ГМ13	Болгару Константин Александрович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Верещагин В.И.	Д.т.н., профессор		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу: «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кацук Ирина Вадимовна	к.т.н., доцент		

По разделу: «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Антоневич Ольга Алексеевна	К.б.н., доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Казьмина О.В.	Д.т.н., профессор		

Томск – 2023 г.

**ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ
ПО ООП 18.04.01 ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ**

Код компетенции	Результат обучения (выпускник должен обладать)
<i>Универсальные компетенции</i>	
УК(У)-1	способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	способен управлять проектом на всех этапах жизненного цикла
УК(У)-3	способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(-ых) языке(-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	способен определить и реализовать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
<i>Общепрофессиональные компетенции</i>	
ОПК(У)-1	готовность к коммуникации в устной и письменной формах на русском и иностранном языках для решения задач профессиональной деятельности
ОПК(У)-2	готовность руководить коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
ОПК(У)-3	способность к профессиональной эксплуатации современного оборудования и приборов в соответствии с направлением и профилем подготовки
ОПК(У)-4	готовность к использованию методов математического моделирования материалов и технологических процессов, к теоретическому анализу и экспериментальной проверке теоретических гипотез
ОПК(У)-5	готовность к защите объектов интеллектуальной собственности и коммерциализации прав на объекты интеллектуальной собственности
<i>Профессиональные компетенции</i>	
ПК(У)-1	способность организовывать самостоятельную и коллективную научно-исследовательскую работу, разрабатывать планы и программы проведения научных исследований и технических разработок, разрабатывать задания для исполнителей
ПК(У)-2	готовность к поиску, обработке, анализу, систематизации научно-технической информации по теме исследования, выбору методик, средств решения задачи
ПК(У)-3	способность использовать современные приборы и методики, организовывать проведение экспериментов и испытаний, проводить их обработку и анализировать их результаты
ПК(У)-4	готовность к решению профессиональных производственных задач - контролю технологического процесса, разработке норм выработки, технологических нормативов на расход материалов, заготовок, топлива и электроэнергии, к выбору оборудования и технологической оснастки
ПК(У)-5	готовность к совершенствованию технологического процесса - разработке мероприятий по комплексному использованию сырья, по замене дефицитных материалов и изысканию способов утилизации отходов производства, к исследованию причин брака в производстве и разработке предложений по его устранению
ПК(У)-6	способность к оценке экономической эффективности технологических процессов, оценке инновационно-технологических рисков при внедрении новых технологий
ПК(У)-7	способность оценивать эффективность новых технологий и внедрять их в производство
<i>Профессиональные компетенции университета</i>	
ДПК(У)-1	готовность к разработке учебно-методической документации для реализации образовательных программ

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки - химическая технология
 Кафедра технологии силикатов и наноматериалов

УТВЕРЖДАЮ:
 Зав. кафедрой

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Выпускной квалификационной работы магистра
--

Студенту:

Группа	ФИО
4ГМ13	Болгару Константин Александрович

Тема работы:

Синтез композиций нитрида хрома, нитрида кремния и железа азотированием ферросиликохрома в режиме горения	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	от 25.01.2023 № 25-61/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08.06.2023
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Данные литературного обзора
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Исследование основных закономерностей горения ферросиликохрома в азоте с целью определения оптимальных условий получения нитридных композиций. Выявление влияния основных технологических параметров СВС на химический и фазовый состав композиции «CrN-Si ₃ N ₄ – Fe». Изучение физико-химических свойства полученных материалов на основе нитридов хрома и кремния.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант

«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Кашук И.В.
«Социальная ответственность»	Антоневич О.А
«Social responsibility»	Тайдонова С.С.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Раздел «Социальная ответственность»	
Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор кафедры ТСН	Верещагин В.И.	д.т.н., профессор		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ГМ13	Болгару К.А.		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа ИШНПТ
 Направление подготовки 18.04.01 Химическая технология
 Уровень образования магистратура
 Отделение школы (НОЦ) НОЦ им Н.М. Кижнера
 Период выполнения (осенний / весенний семестр 2022/2023 учебного года)

Форма представления работы:

Выпускная квалификационная работа магистра

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

Обучающегося:

Группа	ФИО
4ГМ13	Болгару Константин Александрович

Тема работы:

Синтез композиций нитрида хрома, нитрида кремния и железа азотированием ферросиликохрома в режиме горения

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08.06.2023
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
06.06.2023	Основная часть	75
07.06.2023	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
08.06.2023	Социальная ответственность	10

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Верещагин В.И.	Д.т.н, профессор		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Казьмина О.В.	Д.т.н, профессор		

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ГМ13	Болгару К.А.		

РЕФЕРАТ

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, СВС, фильтрационное горения, азотирование, нитриды

Объектом исследования является сложный промышленный ферросплав – ферросиликохром.

Цель работы - исследование процессов горения ферросиликохрома в режиме самораспространения в условия естественной фильтрации азота для получения нитридсодержащего композиционного материала на основе нитрида хрома и нитрида кремния.

В ходе работы проводились исследования процесса азотирования сложного ферросплава – ферросиликохрома в режиме горения. Получены результаты зависимостей от следующих параметров: давления газообразного азота, диаметра, дисперсности и плотности исходных образцов на максимальную температуру и процесс горения исходной порошковой шихты на основе ферросиликохрома. Разработан железосодержащий композиционный материал, который содержит в своём составе два нитридных соединения – нитрид хром и нитрид кремния.

Область применения: полученные образцы рекомендуется применять в качестве коррозионностойких покрытий и в качестве катализаторов для деструкции растворимых органических загрязнителей.

Оглавление

Введение	10
1. Литературный обзор. Нитриды хрома и кремния, методы их получения	13
1.1 Получение нитридов хрома	13
1.2 Получение нитрида кремния	14
1.3 Методика самораспространяющегося высокотемпературного синтеза	15
1.4 Азотирование хрома и феррохрома методом СВС	17
1.5 Азотирование кремния и ферросилиция методом СВС	19
1.6 Постановка цели и задач исследования	21
2. Объекты и методы исследования	24
2.1 Характеристика объектов исследования	24
2.2 Методы исследования	26
2.2.1 Метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза	26
2.2.2 Методы химического и рентгенофазового анализов	28
2.2.3 Методика определения удельной поверхности	29
2.2.4 Методика определения каталитической активности материалов при озонировании и ультрафиолетовом облучении	30
3. Экспериментальная часть	31
3.1 Горение ферросиликохрома	31
3.2 Закономерности азотирования ферросиликохрома	33
3.3 Азотирование ферросиликохрома в присутствии добавки предварительно азотированного ферросиликохрома	38
3.4 Сравнительный анализ азотирования ферросиликохрома и феррохромалюминия	39
3.5 Физико-химические свойства синтезированных нитридов	42
3.6 Фотокаталитическая окислительная деструкция диклофенака натрия в	

водных растворах с использованием металлокерамических композитов	44
Выводы по работе	47
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	49
Введение	50
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	51
4.1.1 Потенциальные `потребители `результатов `исследования	51
4.1.2 Анализ `конкурентных технических `решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	52
4.1.3 SWOT-анализ	54
4.2 Планирование научно-исследовательских работ	55
4.2.1 Иерархическая структура работ проекта	55
4.2.2 Определение трудоемкости выполненных работ и разработка графика проведения	57
4.3 Бюджет научно-технического исследования	60
4.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования	60
4.3.2 Расчет амортизации специального оборудования	61
4.3.3 Основная заработная плата исполнителей научно-исследовательской работы	64
4.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды	64
4.3.5 Накладные расходы	64
4.3.6 Формирование бюджетных затрат научно-исследовательского проекта	65
4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	65
Выводы по разделу	68
5. Социальная ответственность	69
Введение	69

5.1 Производственная безопасность	74
5.2 Экологическая безопасность	79
5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	81
Выводы по разделу	82
Заключение по работе	
Список публикаций студента.....	83
Список литературы	85
Приложение	86

Введение

Нитриды, как класс материалов являются востребованы в различных областях промышленности, поскольку обладают уникальными физико-химическими свойствами. Данные соединения рядом повышенных характеристик таких как тугоплавкость, износостойкость, коррозионная стойкость, а также стойкость к агрессивным средам.

Среди нитридов следует отметить такие соединения как нитрид хрома и нитрид кремния. Соединения на основе нитридов хрома и кремния обладают коррозионной, жаро- и износостойкостью, значительной твердостью, а также стойкость к агрессивным средам, вследствие чего данные соединения имеют высокий как научный, так и коммерческий потенциал.

Нитриды получают по классическому способу – печным синтезом, в атмосфере азотсодержащего газа [1]. При этом методе получения нитридов происходят высокие затраты энергии (особенно это касается производства), а также требуется громоздкое, дорогое и часто сложное оборудование.

Метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) является одним из перспективных методов получения нитридов хрома и кремния. Академик А.Г. Мержанов с сотрудниками в 1967 году открыл этот метод синтеза при горении конденсированных систем. В настоящее время методом фильтрационного СВС в среде азота получено большое количество материалов, в частности нитридных [2-5]. Ряд нитридных материалов обладают уникальными физико-химическими свойствами [6-8] и могут быть использованы в производстве компонентов газотурбин [9], теплоотводных радиаторов [10], режущих инструментов [11, 12], фотокатализаторов [13], полупроводников [14] и т.д.

Наиболее перспективно в методе фильтрационного СВС использование доступных и относительно дешевых ферросплавов. При использовании в процессах СВС ферросплавов возможно получить нитридный материал с относительно низкой себестоимостью без потери качества продукта. Железо,

входящее в состав ферросплавов, оказывает каталитическое действие на процесс азотирования остальных элементов, которые входят в состав исходной смеси [15]. Таким образом, железо позволяет увеличить интенсивность и глубину азотирования исходного материала. Имеется достаточно большой объем работ, посвященных фильтрационному горению простых ферросплавов. В работах [16-17] достаточно подробно изучены закономерности азотирования ферросилиция. В работе [18] изучены закономерности фильтрационного горения феррохрома и феррованадия. Авторами в статье [19] проведено исследование горения в азоте промышленного ферротитана. В монографии [20] описано азотирование ферробора и феррониобия в режиме горения.

Однако интересным и малоизученным является использование в процессах фильтрационного горения сложных ферросплавов. Сложными ферросплавами являются сплавы железа с двумя и более элементами. На данный момент изучено СВС горение ферросиликоалюминия [21-22] и ферроалюмосиликоциркония. Методом СВС из сложного промышленного ферросплава, имеющего два нитридообразующих элемента (нитриды хрома и кремния) впервые был получен азотированный ферросиликохром.

Наиболее значимыми условиями, влияющими на синтез нитридов в процессах фильтрационного самораспространяющегося высокотемпературного синтеза это давление азота, размер исходных порошков и размер шихты. Кроме того, непосредственно при осуществлении СВ-синтеза необходимо контролировать следующие параметры: скорость распространения фронта реакции, изменение температуры волны горения; глубина превращения химической реакции. Варьируя всеми вышеперечисленными параметрами возможно подобрать оптимальные условия для получения качественного целевого продукта продукта.

Объектом исследования данной работы является продукт возникший при дроблении сложного промышленного ферросплава – ферросиликохрома.

Предмет исследования – изучение физико-химических процессов, которые протекают при получении композиционных материалов на основе нитридов хрома и кремния методом СВС, а также формирование фазового и структурного состава и свойств синтезированных материалов.

Цель данной работы – исследование процессов горения ферросиликохрома в режиме самораспространения в условии естественной фильтрации азота для получения нитридсодержащего композиционного материала на основе нитрида хрома и нитрида кремния.

Для достижения цели работы поставлены следующие задачи:

1. Исследовать основные закономерности азотирования ферросиликохрома методом СВС для получения композиций на основе «CrN-Si₃N₄ – Fe» в оптимальных условиях.
2. Определить какие из технологических параметров горения оказывают наибольшее влияние на фазовый состав композиции «CrN-Si₃N₄ – Fe».
3. Изучить физико-химические свойства полученных материалов на основе нитридов хрома и кремния.

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1. Нитриды хрома и кремния, методы их получения

1.1 Получение нитридов хрома.

На данный момент существует ряд промышленных методов получения нитридов хрома. Основными методами являются:

- прямой синтез порошка хрома с азотом;
- карботермический синтез, основанный на восстановлении оксидов (в том числе сложных), содержащих нитридообразующие элементы углеродом;
- газофазный синтез;
- плазмохимический синтез (ПХС);
- самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС);

Нитрид хрома является полупроводником и обладает высокой стойкостью к окислению и удельным сопротивлением. В природе нитрид хрома практически невозможно обнаружить, исключением является метеоритные породы в минерале Карлсбергит, в форме CrN. [23].

В работе [24] показан способ получения нитрида хрома состава CrN в котором при разложении амальгамы тонкий пирофорный порошок обрабатывали азотом в диапазоне температур 600÷900 °С .

В работе [25] при азотировании чешуйчатого порошка хрома получали нитрид хрома при изменении параметров давления и температуры. Изменение температуры варьировалась в диапазоне от 1100 до 1400 °С, в то время как давление азота изменяли в пределах 0,5÷45 мм.рт.ст. Было показано, что от изменения давления и температуры состав оставался неизменным, образовывались двухфазные образцы, состоящие из нитрида хрома (состава Cr₂N) и твердого раствора азота в хrome.

Порошок электролитического хрома содержащий незначительную примесь железа, был исследован в работе [26]. Лодочку с порошком помещали в кварцевую трубку, которая находилась в печи, и через трубку осуществляли продувку азота. Исследование показало, что при всех изученных температурах

наиболее эффективным является время выдержки 3600 с. При этом в диапазоне температур 800÷1000 °С происходило максимальное поглощение азота. Повышение температуры свыше 1000 °С приводило к уменьшению содержания азота в конечном продукте. Данную зависимость авторы [27] объяснили тем, что при температуре выше 1050 °С нитрид хрома CrN теряет устойчивость и переходит в Cr₂N с выделением азота.

1.2 Получение нитрида кремния.

Реакция кремния с азотом происходит следующему уравнению (1), с образованием химического соединения нитрид кремния (Si₃N₄). Нитрид кремния способен существовать в трех основных модификациях: α-Si₃N₄ (низкотемпературной), β-Si₃N₄ (среднетемпературной) и γ-Si₃N₄ (высокотемпературной), которые не различаются по составу и плотности, а имеют различия в атомной структуре.

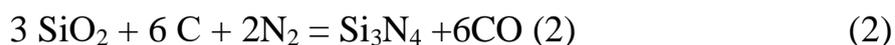
Для получения нитрида кремния существует достаточно большое количество способов.

1. Прямое азотирование газообразным азотом. Проводится при температуре 1000÷1600°С по реакции (1) тонкодисперсных порошков кремния, сформованных различными способами:



Данная реакция является экзотермической. Особенностью данного метода является стадийность, где на первой стадии азотирование проводят на 100-250 °С ниже температуры плавления кремния до связывания в нитрид для избежания процессов спекания. На втором этапе происходит окончательное доазотирование. Зачастую в качестве азотирующего агента используют аммиак для снижения температур азотирования.

2. Карботермическое восстановление оксида кремния углеродом в среде азота [28, 29] Метод реализуется согласно следующей реакции:



Данный метод достаточно широко известен. В качестве исходных реагентов могут служить как природные (диатомитовая земля, природный туф), так и техногенные (кремнезем, кремниевая кислота) материалы. Особенностью данного метода является возможность получения монозернистых и активно спекающихся порошков. К недостаткам данного метода можно отнести наличие в продукте карбидов, которые образуются при восстановлении оксидов, что ограничивает возможности использования данного метода в промышленности.

3. Плазмохимический метод. Синтез проводится в низкотемпературной плазме (5000÷10000 К). Данный метод формирования дисперсных частиц из парогазовой фазы основан на процессах испарения и конденсации [30,31];

4. Газофазный синтез. В основе данного синтеза лежит взаимодействие силана, галогенидов кремния с азотсодержащими смесями. С помощью данного метода возможно получить нитриды имеющую высокую чистоту и мелкую структуру порошков. Однако главным недостатком метода является маленькая производительность, а стоимость полученных нитридов значительно выше, относительно порошков, полученных другими способами.

Помимо основных представленных выше методов получения следует отметить такие методы как электрохимический синтез, синтез в ударных волнах, механосинтез и самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС).

1.3 Методика самораспространяющегося высокотемпературного синтеза

Метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза был открыт академиком Мержановым А.Г. с сотрудниками в 1967 г [32-35]. Основа метода СВС заключается в проведении экзотермических реакций с образованием ценных продуктов в режиме горения.

Главными преимуществами СВС метода, относительно других методов спекания, являются следующие:

1. Превращение реагентов в конечный продукт происходит при высоких

температурах процесса, которые позволяют существенно повысить его скорость. Малые времена синтеза приводят к повышению производительности на стадии самого синтеза и как следствие к изменению соотношения продолжительностей различных стадий производства.

2. За счет использования менее дорогой химической энергии, которая возникает в процессе синтеза вместо электрической, значительно возрастает энергоэффективность процесса.

3. Для СВС процесса требуется относительно простое оборудование.

Можно выделить три основных вида процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза:

1. Безгазовый синтез. Его основу представляет реакция между твердыми веществами (двумя и более), которые находятся в атмосфере инертного газа. Поскольку в безгазовом синтезе как сам протекающий процесс, так и структура конечных продуктов, мало зависит от газовой среды, то основными параметрами, влияющими на скорость синтеза и структуру конечных продуктов, являются следующие:

- концентрации и чистота реагентов;
- дисперсность и плотность шихты;
- температурные характеристики синтеза.

Представленным методом получают следующие вещества: бориды, силициды, карбиды металлов, интерметаллиды и другие соединения.

2. Фильтрационный СВС. В системах «твердое-газ» осуществляется процесс фильтрационного или газопоглощающего СВС. Путем фильтрации в объём образца реакционный газ поступает к реагирующему веществу при относительно невысоких давлениях (как правило не превышающих 10 МПа). Выделяют две основные разновидности газопоглощающего СВС:

- в первом случае давление является движущей силой течения газа внутрь образца синтез. Это так называемая естественная фильтрация газообразного реагента;

- во втором случае с помощью внешнего источника газа происходит синтез с вынужденной фильтрацией.

Используя метод фильтрационного СВС, получают такие соединения как: нитриды, гидриды, оксиды.

3. К третьей группе процессов относят процессы СВС с сильным газовыделением. Особенность данного синтеза заключается в наличии в шихте систем с легколетучими компонентами. В качестве таких компонентов могут служить такие вещества как: сера, теллур, фосфор, и т.д. Для данного процесса фильтрация выделяющихся газов имеет такое большое значение, как и для фильтрационного СВС. Существенным недостатком таких систем являются трудности, связанные с возможными потерями реагентов.

1.4 Азотирование хрома и феррохрома методом СВС

Азотированный феррохром применяют в качестве лигатуры при выплавке азотсодержащих сталей, обладающей коррозионной стойкостью. Использование азотированного феррохрома для легирования сталей позволяет уменьшить долю более дорогих металлов (к примеру никеля), а введение азота повышает прочность стали при этом сохраняя её пластичность. Недостатками применяемого в промышленности вакуум-термический метода получения азотированного феррохрома являются высокие энергетические затраты и значительная длительность процесса. При внедрении в промышленность метода СВС можно получать азотированный феррохром с более низкими затратами электроэнергии за короткие времена. В настоящее время на основе феррохрома с добавками различных металлов (таких как марганец, никель и др.) методом СВС изготавливают сложные азотсодержащие легирующие сплавы, что значительно расширяет класс выпускаемых сталей.

Из литературы известно, что хром в процессе азотирования образует два нитрида – Cr_2N и CrN . Образование нитридов хрома в волне горения напрямую связано с низкой температурой диссоциации CrN .

В работе [36] показано, что горение хрома в азоте состоит из двух основных стадий.

Первая стадия – образование соединения Cr_2N :



Вторая стадия – образование соединения CrN :



Максимальная температура в процессе СВ-синтеза ограничена температурой диссоциации CrN , т.е. скорость распространения волны горения определяется скоростью реакции по первой стадии. Дореагирование хрома происходит за фронтом горения, т.е. происходит последующее доазотирование продукта.

Характерной особенностью азотирования хрома в СВС процессах является увеличение его объёма. Так, при горении частиц хрома в азоте с образованием нитрида состава Cr_2N объём образца увеличивается на 27%, а при превращении Cr в CrN – образец увеличивается на 49%. Это связано с возникновением напряжений перед фронтом горения, которые возникают по мере продвижения волны горения. Горение порошка хрома осуществляется в нестационарном режиме, кроме того полученный материал макронеоднороден. Горение прессованных образцов так же проходит в нестационарном режиме. Во время распространения волны горения по прессованному образцу перед фронтом возникают напряжения, вследствие чего перед фронтом горения образуются трещины. В то же время трещины создают каналы для фильтрации азота к зоне реакции. Нестационарность горения в этом процессе обусловлена образованием трещин перед фронтом горения, а не наличием спинов или очаговых эффектов .

Азотирование феррохрома без проведения, каких либо методов предварительной подготовки реагентов невозможна. Так одним из методов является предварительный подогрев сплава до 300°C , после чего происходит активация СВС процесса. Использование предварительной механической активации ферросплава позволяет проводить СВ-синтез при низких значениях

давления азота (0.5 МПа) и в отсутствии предварительного подогрева.

При азотировании феррохрома давление оказывает значительную роль на фазовый состав продукта. При увеличении давления азота выше 6 МПа основной фазой является моонитрид хрома CrN. Смесь фаз CrN и Cr₂N образуется при давлении 4-6 МПа. А при давлении азота менее 4 МПа преобладающей фазой является Cr₂N.

1.5 Азотирование кремния и ферросилиция методом СВС

Нитрид кремния как соединение обладает исключительной химической стойкостью, в результате которой он устойчив как к действию сильных окислителей, (кислород, хлор, фтор и т.д.), так и ко многим расплавленным металлам (алюминий, магний и т.д.). Выше уже говорилось о том, что существует много способов получения нитрида кремния, среди которых прямой синтез кремния в азотсодержащей среде (азот, аммиак), восстановление кремнийсодержащих оксидов углеродом при нагревании в среде азотсодержащего газа и др.

Принципиально новый способ получения нитрида кремния с помощью СВ-синтеза открыл новые перспективы в промышленном производстве. Такая технология позволяет использовать в качестве исходного сырья ферросплавы, в частности ферросилиций. Наличие в ферросилиции большого количества кремния (от 45 до 85 % мас. в зависимости от марки) позволяет получать продукт реакции с повышенным содержанием нитрида кремния. Чтобы улучшить физико-химические свойства получаемых нитридов исходную шихту разбавляют тугоплавкими компонентами. Ведение тугоплавких добавок позволяет значительно расширить ассортимент материалов, которые находят свое применение в качестве твердых сплавов и носителей катализаторов, огнеупоров и химически стойких изделий и др.

В зависимости от температуры и давления азотсодержащего газа кремний при взаимодействии с последним образует одно химическое соединение Si₃N₄, но

в трех модификациях: α , β , и γ - Si_3N_4 . Как показано [37] азотирование пористых образцов происходило в широком интервале давлений (от 6 до 200 МПа). Исходя из вышеперечисленного можно сформулировать следующие заключение:

Послойного горения порошка кремния не наблюдается, поскольку горение кремния в азоте происходит в нестационарном режиме. Достигнуть стационарного режима горения кремния в азоте возможно, если разбавлять его конечным продуктом, который должен содержать в своем составе и нитрид кремния и непрореагировавший кремний. Скорости горения возрастают с ростом давления как у большинства систем Me-N в фильтрационном СВС.

При высоких температурах нитрид кремния подвержен диссоциации. При температуре около 1900°C и давлении около 1 МПа нитрид кремния диссоциирует на кремний, который входит в жидкую фазу, и азот. Максимальная температура горения данной системы лимитируется температурой диссоциации нитрида кремния. В газопоглощающем СВС процессе важным фактором для азотирования кремния является фильтрация газа к зоне реакции и процессы, происходящие в зоне прогрева, в частности плавление кремния. Азот принимает участие в реакции на обеих стадиях: и на стадии СВ-синтеза в волне горения и после прохождения фронта волны горения, на стадии доазотирования. Помимо этого азот находится в порах образца и проникает через непрореагировавшую часть образца навстречу фронту горения .

Более детально исследование процесса азотирования ферросилиция марки ФС75 было представлено в работах ТНЦ СО РАН [38]. В работе использовали двухфазный ферросилиций: одной из фаз был силицид железа в виде лебоита, второй фазой – кремний. Согласно диаграмме состояния система Fe-Si имеет следующие основные силициды: Fe_3Si , Fe_5Si_3 , FeSi , FeSi_2 .

При СВС – реакции азотирования ферросилиция основная энергия выделяется за счет взаимодействия кремния с азотом. Железо, которое образуется за счет разложения силицидов железа, является относительным инертным веществом по двум причинам: с одной стороны железо забирает на себя часть

выделившегося тепла, а с другой в волне горения происходит образование нитридов железа, которые являются термически нестабильными и разлагаются при температуре более 600 °С. Кроме того, для азотирования кремния в качестве катализатора применяется именно железо. Это объясняется тем, что железо является акцептором электронов, и оно способно разрывать прочную тройную связь N-N вследствие образования линейного комплекса $\text{Fe-N}\equiv\text{N}$.

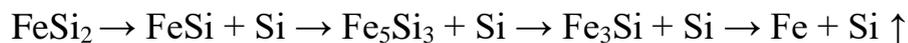
Таким образом, при горении ферросилиция, азот поступает в зону горения двумя путями: путем фильтрации по порам образца из окружающего объема, а также в процессе разложения термически неустойчивых нитридов железа. Главные закономерности скорости горения и степени азотирования ферросилиция от давления азота практически повторяют зависимости для горения чистого кремния.

Согласно результатам рентгенофазового анализа продукты синтеза кроме целевой фазы и железа содержали также непрореагировавший кремний и продукты ступенчатой диссоциации дебоита в виде: FeSi_2 , FeSi , Fe_5Si_3 , Fe_3Si . Введение в исходную шихту добавки, представляющий собой конечный продукт является известным методом, приводящему к увеличению глубины превращения реакции. С целью предотвращения коагуляции частиц и возникновению расплава в предреакционном слое в исходную шихту вводят азотированный ферросилиций. Это способствует увеличению скорости распространения волны горения и глубины превращения. К тому же введение данной добавки переводит режим горения в стационарный, что приводит к макро- и микро-однородности полученного материала.

Говоря о механизме азотирования ферросилиция следует отметить, что он отличается от механизма азотирования чистого кремния. Помимо чистого кремния в ферросилиции содержится ряд силицидов (Fe_3Si , Fe_5Si_3 , FeSi и FeSi_2), которые в процессе горения взаимодействуют друг с другом. Данный ряд силицидов обладает различной температурой плавления, термической устойчивостью, различной скоростью взаимодействия с азотом, что делает

механизм реакции особенным.

Схематично разложение ферросилиция с образованием продуктов ступенчатой диссоциации, с одновременным выделением кремния можно представить следующим образом:



В работе [23] показаны четыре основных механизма азотирования процесс ферросилиция:

- «твердое–газ»
- «жидкость–газ»
- «пар–газ»
- «пар–жидкость–кристалл»

Прямое взаимодействие кремния с азотом по механизму «твердое–газ» в процессе СВС не превышает 2-3% от общего объёма. В основном данный механизм реализуется при малых температурах в зоне прогрева, т.е. непосредственно перед волной горения. Общий вклад данного взаимодействия вносит минимальный эффект, поскольку основная реакция СВС происходит при более высоких температурах. Вследствие этого в системе Fe-Si-N существенно превышает температура плавления жидкой фазы. Поэтому большая часть кремния находится в жидком и газообразном состоянии. Поскольку основной кремний находится в жидкой и газообразной фазе то азотирование его проходит по двум механизмам: пар-жидкость-кристалл (ПЖК) и газ-пар. Рост кристаллов нитрида кремния в процессе реакции происходит по двум механизмам: по механизму «пар-жидкость-кристалл» и через кристаллизацию из железокремниевого расплава.

1.6 Постановка цели и задач исследования

Проведенный анализ литературных данных получения материалов на

основе нитрида кремния и нитрида хрома показал, что для получения данных нитридных соединений используются методы, в которых длительный технологический процесс, большие энергетические затраты, и в некоторых случаях сложность оборудования. Зачастую для получения материала на основе Si_3N_4 и CrN используются дорогостоящие чистые кремния и хрома.

Использование метода СВС, характеризующийся малой продолжительностью процесса и низкими энергозатратами является одним из перспективных способов получения нитридсодержащих материалов. Данный метод обеспечивает получение материалов с высокой степенью чистоты благодаря выгоранию большинства примесей в процессе горения.

Важно отметить, что сведений по синтезу керамической композиции Si_3N_4 – CrN из сложных промышленных ферросплавов методом СВС нет.

Исходя из выше изложенного можно сформулировать цель и задачи исследований:

Целью данной работы – исследование процессов горения ферросиликохрома в режиме самораспространения в условии естественной фильтрации азота для получения нитридсодержащего композиционного материала на основе нитрида хрома и нитрида кремния.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1. Исследовать основные закономерности горения ферросиликохрома в азоте для выявления оптимальных условий синтеза нитридных композиционных материалов.
2. Выявить влияние основных технологических параметров СВ- синтеза на фазовый и химический состав композиции « $\text{CrN-Si}_3\text{N}_4 - \text{Fe}$ ».
3. Изучить физико-химические свойства полученных материалов на основе нитридов хрома и кремния.

2. Объекты и методы исследования

2.1 Характеристика объектов исследования

Объектом исследований явился сложный промышленный ферросплав – ферросиликохром, марки ФСХ48. На данный момент ферросиликохром получают двумя способами: шлаковым и бесшлаковым. Бесшлаковый способ получения основан на восстановлении кремния из кремнезема углеродом в присутствии передельного углеродистого феррохрома (ГОСТ 11861-91) и основан на протекании суммарной реакции:



Для получения ферросиликохрома может быть использовано сырье с пониженным содержанием хрома и повышенным содержанием кремния. В сталеплавильной и литейной промышленности такой сплав используют в качестве комплексного раскислителя стали и восстановителя. Химический состав сплава представлен в таблице 1.

Так же сплав содержит следы алюминия кремния и азота. На рисунке 1 представлен внешний вид используемого ферросплава. Дисперсность порошка используемого в работе составляла не более 100 мкм.

Таблица 1 – Химический состав ферросиликохрома

Исходный сплав	Марка	Содержание основных компонентов, мас. %			Содержание примесей, не более мас. %		
		Si	Fe	Cr	C	S	P
Ферросиликохром	ФСХ45	62.4	15.03	22.19	0.01	0.2	0.05



Рисунок 1 – Фотография сплава ФСХ48

По результатам рентгенофазового анализа данный ферросплав является многофазным материалом и содержит в своём составе фазы: CrSi_2 , Si и FeSi_2 (Рисунок 2).

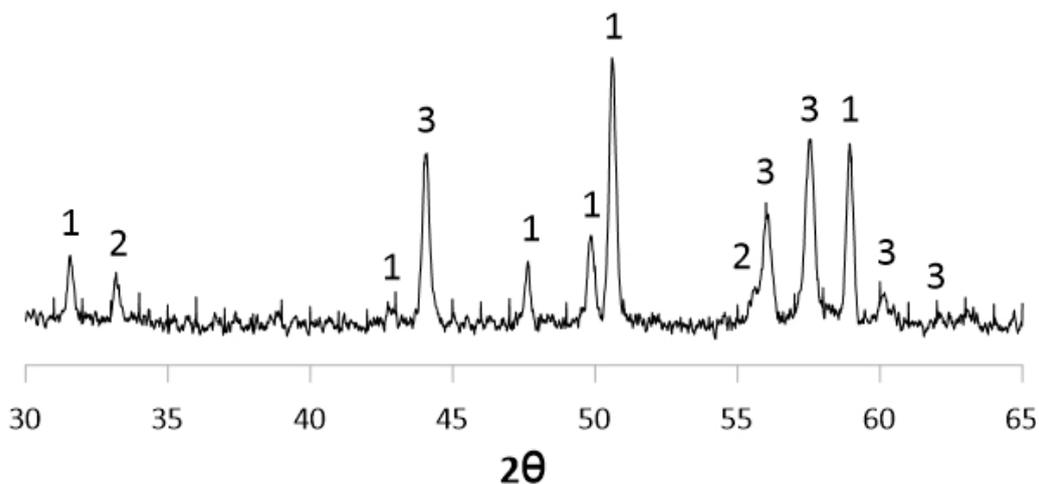


Рисунок 2. Рентгеновская дифрактограмма ферросиликохрома (1- CrSi_2 , 2 – Si , 3 – FeSi_2).

По результатам химического анализа ФСХ содержит в своём составе Si – 62.4 масс. %, Cr – 22.19 масс. %, Fe – 15.03 масс. % и остальные незначительные примеси.

В работе использовали газообразный азот полученный по ГОСТ 9293-74 (Таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Газообразный азот

Наименование	Норма для марки газообразного и жидкого азота
--------------	---

Азот газообразный и жидкий		Особой чистоты		Повышенной чистоты		Технический	
		1-ый сорт	2-ой сорт	1-ый сорт	2-ой сорт	1-ый сорт	2-ой сорт
1	Азота, не менее	99,999	99,996	99,99	99,95	99,6	99,0
2	Кислорода, не более	0,0005	0,001	0,001	0,05	0,3	0,1
3	Водяных паров в газообразном азоте, не более	0,0007	0,0007	0,001	0,004	0,009	

2.2 Методы исследования

2.2.1 Метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза

Для проведения азотирования в режиме самораспространения исходный ФСХ готовили следующим образом:

1. шихту измельчали в шаровой мельнице;
2. измельченный порошок сушили в вакуумном сушильном шкафу при температуре 150 – 300 °С в течение 3 часов для удаления влаги и летучих примесей.

По методике [39] проводили СВ-синтез в установках постоянного давления, которая представляет собой герметичный толстостенный сосуд объемом 5 литра. Ввод газа и сброс давления осуществляется с помощью подведенных вентилях. Установка оснащена манометром для контроля давления, каналами для термопарных измерений, атак же источником импульса для поджигания системы (Рисунок 3).

Для проведения СВ-синтеза измельченный порошок помещали в цилиндрические контурные сетки, для свободного доступа газа к образцу, различного диаметра (20 - 60 мм). Синтез осуществляли при варьировании давления азота от 10 до 60 МПа. Инициацию реакции проводили с помощью

подведенной к образцу спирали, под действием электрического тока спираль накаливалась приводя к возгоранию шихты. Тепловой эффект такой поджигающей смеси достаточен для воспламенения шихты. В фильтрационном горении плотность образцов является важным параметром. Поэтому насыпная плотность шихты, которая использовалась в эксперименте, составляла $\approx 0,7 \text{ г/м}^3$.

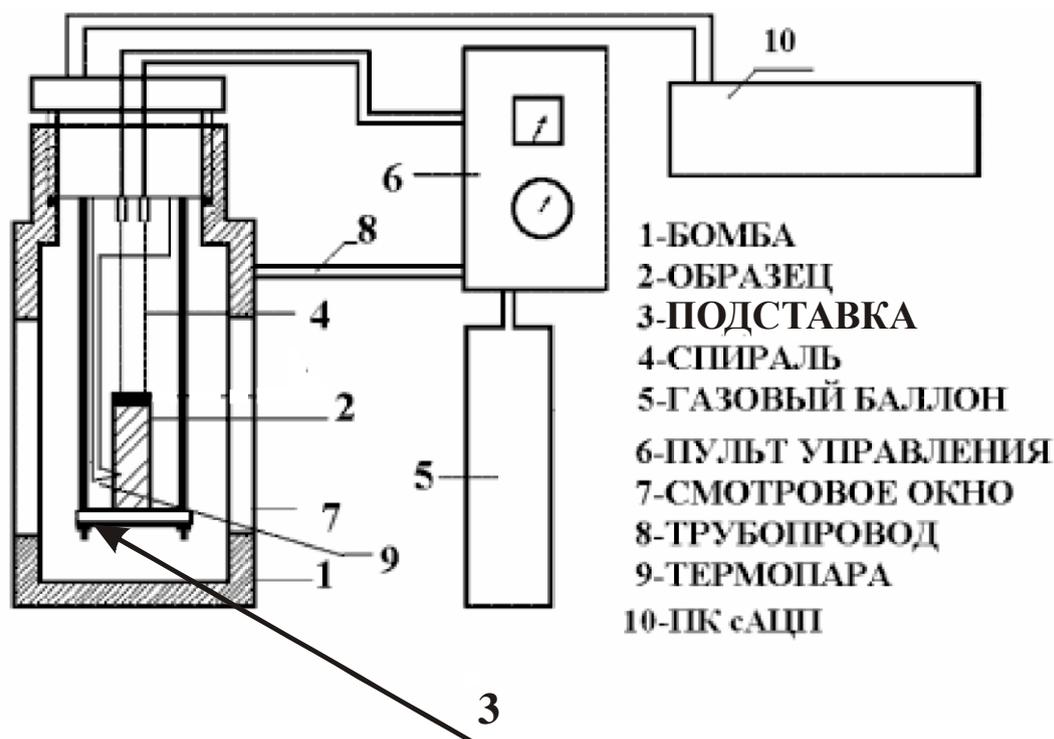


Рисунок 3. Схема экспериментальной установки.

Выделяющееся тепло от спирали переходит к шихте, что в результате инициирует цепь химических реакции горения от слоя к слою в образце. Таким образом, возникает волна горения. После того, как волна горения достигла торца образца, для полного доазотирования образец выдерживался в установке без сброса давления (в среде азота) до полного остывания не менее 30 минут. Затем образец извлекали для дальнейших исследований.

Измерение максимальных температур горения в образцах осуществляли с помощью термопар. Для изготовления термопар использовалась вольфрам-

рениевая проволока толщиной 100 мкм с содержанием 5% мас. рения и вольфрама с 20 %мас. рения. Термопары изготавливали контактным способом встык. Затем проволоку вводили в корундовую соломку, которую защищали путем покрытия нитридом бора. Полученные термопары устанавливали по центру образца, а регистрируемые сигналы поступали на аналогово-цифровой преобразователь ЛА-20 USB.

С помощью двух термопар, которые находились на определенном расстоянии друг от друга, определяли скорости распространения фронта горения. Средняя скорость горения была рассчитана по следующей формуле:

$$V = h / t_{\text{гор}},$$

где h – расстояние между термопарами (мм); $t_{\text{гор}}$ – время прохождения волны горения от одной термопары к другой (сек).

2.2.2 Методы химического и рентгенофазового анализ

Фазовый состав продуктов горения определяли методом рентгенофазового анализа (РФА), на дифрактометре Shimadzu XRD-6000 (Япония) с использованием Co -излучения и XRD – 6000. Скорость съемки составляла 2 – 4 град /мин, напряжение анод – катод 30 – 40 кВ, анодный ток 15 – 25 мА. Дифракционную картину фиксировали с помощью самопишущего потенциометра КСП – 4. Расшифровку полученных результатов получали с помощью баз данных PCPDFWIN и JCPDS, используя программы полнопрофильного анализа POWDER CELL, IDENT – 4, IDENT – 5.

Общее содержание азота в полученных образцах было определено двумя методами:

1. Гравиметрический метод: определяли массу образцов до СВС процесса и после синтеза .

2. Общее содержание таких элементов как: азот и кислород и водород фиксировали на приборе LECO – ONH836 (США). Проба находится в высокочистом графитовом тигле при температурном воздействии выше 3000 °С.

в атмосфере гелия. Азот в пробе выделяется в молекулярной форме и определяется с помощью ячейки теплопроводности. Кислород в пробе взаимодействует с углеродом, входящим в состав тигля с образованием оксида углерода (СО и СО₂) и определялся с помощью инфракрасной ячейки.

Содержание железа в образцах определяли двумя методами: химическим восстановлением алюминием до железа (II) с последующим титрованием бихроматом и фотоколориметрическим анализом с сульфосалициловой кислотой.

Содержание кремния определяли путем фотоколориметрического анализа. Его суть заключается в использовании способности кремниевой кислоты в кислой среде образовывать с ионами молибдата окрашенные в желтый цвет гетерополикислоты, которые под действием восстановителя приобретают синюю окраску.

2.2.3 Методика определения удельной поверхности

Перед измерением удельной поверхности проводилась пробоподготовка образцов, которая представляла собой термический нагрев в потоке инертного газа (гелий) при 200 °С в течении 60 мин в станции предварительной подготовки образцов SorbiPrep (Россия) с целью удаления летучих примесей исследуемого образца.

Удельную поверхность образцов определяли на приборе СОРБИ-М (Россия) по 4-х точечному методу БЭТ. В основе метода лежит сравнение объемов газа-адсорбата, сорбируемого исследуемым образцом относительно стандартного образца с известной удельной поверхностью. В качестве газа-адсорбата использовался газообразный азот, в качестве газа-носителя использовался газообразный гелий высокой чистоты.

2.2.4 Методика определения каталитической активности материалов при озонировании и ультрафиолетовом облучении

Содержание растворимых органических загрязнителей в модельных

растворах определяли методом производной УФ/СФ на приборе СФ-56 (Россия). Электронные спектры поглощения записывали в интервале 220–400 нм и по второй производной при длине волны положительного максимума 310 нм измеряли оптическую плотность. Степень фотокаталитической деградации (R, %) НДФ оценивали по формуле:

$$R = (A_0 - A) / A_0 * 100\%$$

где A_0 и A – оптические плотности исходного раствора НДФ и после воздействия УФ излучения соответственно.

Методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) на хроматографе Милихром А-02 (Россия) исследовали модельные растворы, которые содержат продукты окислительной деградации растворимых органических веществ. Разделение проводили на колонке С18 с ультрафиолетовым спектрофотометрическим детектором, со скоростью фильтрации – 250 мкл/мин, при температуре колонки – 35 °С.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
4ГМ13	Болгару Константин Александрович

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	Н.М. Кижнера
Уровень образования	Магистратура	Направление	18.04.01 – Химическая технология

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Отчисления во внебюджетные фонды 30 %</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Анализ конкурентных технических решений (НИ)</i>	<i>Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ</i>
2. <i>Формирование плана и графика разработки и внедрения (НИ)</i>	<i>Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования</i>
3. <i>Составление бюджета инженерного проекта (НИ)</i>	<i>Расчет бюджетной стоимости НИ</i>
4. <i>Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности (НИ)</i>	<i>Интегральный финансовый показатель. Интегральный показатель ресурсоэффективности. Интегральный показатель эффективности.</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>Оценка конкурентоспособности ИР</i>
2. <i>Матрица SWOT</i>
3. <i>Диаграмма Ганта</i>
4. <i>Бюджет НИ</i>
5. <i>Основные показатели эффективности НИ</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.03.2023
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кащук Ирина Вадимовна	к.т.н., доцент		01.03.2023

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ГМ03	Болгару Константин Александрович		01.03.2023

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Введение

Основная цель данного раздела – оценить перспективность развития и планировать финансовую и коммерческую ценность конечного продукта, представленного в рамках исследовательской программы. Коммерческая ценность определяется не только наличием более высоких технических характеристик над конкурентными разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сможет ответить на следующие вопросы – будет ли продукт востребован на рынке, какова будет его цена, каков бюджет научного исследования, какое время будет необходимо для продвижения разработанного продукта на рынок.

Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

- Оценка коммерческого потенциала разработки.
- Планирование научно-исследовательской работы;
- Расчет бюджета научно-исследовательской работы;
- Определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

Цель данной научно-исследовательской работы - исследование процессов горения ферросиликохрома в режиме самораспространения в условиях естественной фильтрации азота для получения нитридсодержащего композиционного материала на основе нитрида хрома и нитрида кремния.

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

При проведении анализа существующей продукции для выявления конкурентных аналогов стоит обратиться к детальному рассмотрению существующего на данный момент целевого рынка, а так же провести его сегментирование. В представленной научно-исследовательской работе получен основной продукт – азотированный ферросиликохром. Данный материал является одним из самых востребованных в процессах выплавки нержавеющей азотсодержащих сталей.

В настоящее время рынок азотированных ферросплавов в целом достаточно широк, однако, что касается азотированных хромсодержащих сплавов, в связи с их узконаправленным применением, ассортимент данной продукции относительно небольшой. В связи с этим стоит вопрос в поиске как материалов, включающих в себя все физико-химические характеристики существующих аналогов, так и иных, менее энергозатратных методов получения

Рассматривая современный российский и международный рынок производства азотированных ферросплавов необходимо отметить ряд значительных преимуществ. Во-первых, использование в производстве данного материала метода СВС, который характеризуется быстротечностью и энергоэффективностью процесса, во-вторых, использования в качестве исходного сырья фракционной пыли, которая возникает при дроблении ферросплавов и является отходом производства.

Полученный материал возможно использовать в различных областях науки и техники. Основным применением данного материала является область металлургии, где азотированный ферросплав применяется в качестве легирования стали. В то же время известно, что материалы на основе нитридов хрома и кремния обладают уникальными физико-химическими свойствами и

могут быть использованы в производстве компонентов газотурбин, теплоотводных радиаторов, режущих инструментов, фотокатализаторов, полупроводников и т.д.

Однако азотированные феррохром и ферросиликохром занимают лишь малую долю всего рынка азотированных ферросплавов, хотя имеют большой потенциал относительно других российских материалов. Одним из главных производителей азотированных ферросплавов является ООО "НТПФ "Эталон" (г. Магнитогорск. Россия).

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Данную продукцию могут производить как малые частные предприятия, так и крупные заводы с многотоннажным производством

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения. Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты, приведенной в таблице 4.1. В качестве конкурентов выбраны ООО "НТПФ "Эталон", получающий продукцию схожим методом (СВС) и АО «Новотроицкий завод хромовых соединений» получающий продукцию печным синтезом.

Таблица 4.1 - Оценочная карта сравнения конкурентных технических решений
Конкурент 1 – ООО "НТПФ "Эталон"; Конкурент 2 – АО «Новотроицкий завод хромовых соединений».

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкуренто-способность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
1. Актуальность исследования	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
2. Микротвердость	0,1	5	5	4	0,5	0,5	0,4
3. Модуль Юнга	0,1	4	3	3	0,4	0,3	0,3
4. Прочность	0,1	4	4	3	0,4	0,4	0,3
5. Простота изготовления	0,05	5	4	2	0,25	0,2	0,1
6. Эффективность работы	0,05	5	4	3	0,25	0,2	0,15
7. Безопасность	0,05	4	4	5	0,2	0,2	0,25
8. Экологичность	0.2	5	5	4	1	1	0,8
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Цена сырья	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
2. Стоимость технологического процесса	0.05	5	4	4	0,25	0,2	0,2
3. Конкурентоспособность продукта	0,05	4	3	5	0,2	0,15	0,25
4. Финансирование научной разработки конкурентных товаров и разработок	0,05	4	5	4	0,2	0,25	0,2
Итого	1	58	53	49	4,65	4,2	3,65

Из таблицы видно, что наиболее сильную позицию среди конкурентов занимает ООО "НТПФ "Эталон". Технология производства данного завода сопоставима с предложенной технологией по таким позициям физико-химические свойства продукта, безопасность, экологичность, финансирование научной разработки.

Продукт, предлагаемый этим заводом, является конкурентноспособным товаром. По оценкам технических и экономических критериям товар обгоняет продукцию АО «Новотроицкий завод хромовых соединений», однако последний обгоняет своего конкурента в тоннажности производимой продукции.

Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибальной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot \text{Б}_i \quad (4.1),$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

Б_i – балл i -го показателя.

Основываясь на знаниях о конкурентах, следует заметить, что:

- основными недостатками конкурентов является сложность технологии производства, большие энергозатраты, дороговизна исходного сырья, что обуславливает повышенную стоимость единицы продукции. Предложенный продукт способен конкурировать с продуктами, уже имеющимися на российском рынке;
- выработка конкурентных преимуществ, которые помогут создаваемому продукту завоевать доверие покупателей, заключается в гарантированной экологичности и безопасности продукта, относительно низкой себестоимости, но высоких прочностных характеристиках.

4.1.3 SWOT-анализ

SWOT-анализ – (Strengths – сильные стороны, Weaknesses – слабые стороны, Opportunities – возможности и Threats – угрозы) – комплексный анализ научного исследования. Результаты SWOT-анализа приведены в таблице 4.2.

По полученным данным можно сделать следующие выводы:

- совокупность низкой стоимости сырья, использование энергосберегающей технологии производства и качества полученной продукции, обеспечивающие сильные стороны проекта благоприятствуют развитию рынка и спроса на производимый товар;
- главной угрозой при производстве является отсутствие спроса, связанного отсутствием возможности производить продукцию в больших объемах, что может сильно ослабить позиции полученной продукции на рынке.

Таблица 4.2 – Матрица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны разрабатываемого материала: С1. Низкая цена исходного сырья, обусловленная использованием в качестве реагентов отходов производства. С2. Высокая микротвёрдость и прочность получаемой продукции. С3. Использование энергосберегающего метода СВС, не требующий затрат энергии в процессе синтеза. С4. Экологичность технологии. С5. Цикличность процесса, т.е. в случае получения некондиционного материала имеется возможность его переработки без затрат</p>	<p>Слабые стороны разрабатываемого материала: СЛ.1. Не обеспечивает большую тоннажность производства по сравнению с печным синтезом</p>
<p>Возможности: В1. Внедрение технологии в металлургическую промышленность В.2 Появление потенциального спроса на данную разработку в иных сферах (использование в качестве катализаторов или носителей катализаторов)</p>	<p>Направления развития Разработка технологии получения композиционных материалов из отходов</p>	<p>Сдерживающие факторы Производство легирующих добавок требует меньше затрат</p>
<p>Угрозы: У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства У2. Снижение стоимости разработок конкурентов У3. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования</p>	<p>Экологичность выбранной технологии, а также использование отходов в качестве сырья вполне способны ослабить влияние перечисленных угроз.</p>	<p>При развитии конкуренции есть риски потери занятой ниши рынка. При добавлении к этому несвоевременного финансового обеспечения угроза потери рынка значительно возрастает</p>

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1 Иерархическая структура работ проекта

Перед началом научно-исследовательских работ в первую очередь необходимо детально проработать план и порядок действий необходимых для

успешного завершения проекта. В первую очередь следует разделить на отдельные этапы, содержание которых определяется спецификой темы, включающих в себя:

1. подготовительный
2. экспериментальный
3. заключительный

Подготовительный этап включает в себя детальную проработку технических и справочных данных согласно теме исследования, подготовку сырьевых материалов, моделирование систем, выбор состава смеси, подготовку необходимого оборудования.

Экспериментальный этап – исследование процессов горения ферросиликохрома в режиме самораспространения в условии естественной фильтрации азота для получения нитридсодержащего композиционного материала на основе нитрида хрома и нитрида кремния.

Структура экспериментального этапа представлена на рисунке 4.1.

Исследование исходного сырья
Моделирование предполагаемого состава
Приготовление исходных модельных композиций
СВ-Синтез
Выявление оптимальных условий синтеза
Помол

Исследование физико-химических свойств полученного материала на соответствие
Результат

Рисунок 4.1 – Иерархическая структура экспериментального этапа.

На заключительном этапе работы проводится обработка полученных данных и оформление результатов исследования в отчет.

4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения

При проведении научных исследований основную часть стоимости разработки составляют трудовые затраты, поэтому определение трудоемкости проводимых работ является важным этапом составления сметы.

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости использована следующая формула:

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{min}i} + 2t_{\text{max}i}}{5}, \quad (4.1)$$

где $t_{\text{ож}i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, человеко-дни;

$t_{\text{min}i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, человеко-дни;

$t_{\text{max}i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, человеко-дни.

Зная величину ожидаемой трудоемкости, можно определить продолжительность каждой i -ой работы в рабочих днях T_{pi} , при этом учитывается параллельность выполнения работ разными исполнителями. Данный расчёт позволяет определить величину заработной платы.

$$T_{pi} = \frac{t_{\text{ож}i}}{Ч_i}, \quad (4.2)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, рабочие дни;

t_{oji} – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, человеко-дни;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Для перевода длительности каждого этапа из рабочих в календарные дни, необходимо воспользоваться формулой (4.3):

$$T_{ki.инж} = T_{pi} \cdot k_{кал}, \quad (4.3)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{кал}$ – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k_{кал.инж} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48 \quad (4.4)$$

где $T_{кал}$ – общее количество календарных дней в году; $T_{вых}$ – общее количество выходных дней в году; $T_{пр}$ – общее количество праздничных дней в году (2020 год).

Расчеты временных показателей проведения научного исследования обобщены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		t_{oji} , чел-дни			
	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Составление плана работ	2	-	4	-	2,8	-	2,8	3,9
2. Постановка цели и задач	1	2	3	4	1,8	3,2	2,5	3,7

3. Литературный обзор проблематики	-	5	-	10	-	5	5	7,4
4. Разработка плана экспериментальных работ	1	3	3	5	1,8	3,8	2,8	4,1
5. Исследование сырьевых материалов	1	5	4	8	2,2	6,2	4,2	6,2
6. Проведение эксперимента	-	5	-	7	-	3,8	3,8	5,6
7. Обработка экспериментальных данных, обсуждение результатов	-	15	-	20	-	17	17	25,1
8. Оформление графической части (таблицы, графики)	-	10	-	15	-	12	12	17,7
9. Разработка презентации и раздаточного материала	2	3	4	5	2,8	3,8	3,3	4,8
Итого:	7	48	18	74	11,4	54,8	53,4	78,5

Исп. 1 – Верещагин В.И., Исп. 2 – Болгару К.А.

Таблица 4.4 – Диаграмма Ганта

№	Вид работ	Исп	T _{кi} кал. дн.	Продолжительность работ												
				февр			март			апр			май			
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	Составление плана работ	Исп1	4	█												
2	Постановка цели и задач	Исп1 Исп2	4	█												
3	Литературный обзор проблематики	Исп2	7		█											
4	Разработка плана экспериментальных работ	Исп2	4			█										
5	Исследование сырьевых материалов	Исп1 Исп2	6			█										
6	Проведение эксперимента	Исп2	5				█									
7	Обработка экспериментальных данных, обсуждение результатов	Исп2	25					█								
8	Оформление графической части (таблицы, графики)	Исп2	18							█						
9	Разработка презентации и	Исп1 Исп2	5											█		

№	Вид работ	Исп	Т кв. кал. дн.	Продолжительность работ											
				февр			март			апр			май		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	раздаточного материала														

 – Верещагин В.И. (научный руководитель),  – Болгару К.А. (инженер)

4.3 Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета научно-технического исследования учитывались все виды расходов, связанных с его выполнением. В этой работе использовать следующую группировку затрат по следующим статьям:

- материальные затраты научно-исследовательской работы (НИР);
- затраты на специальное оборудование для экспериментальных работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы НИР.

4.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования

Материальные затраты — это затраты организации на приобретение сырья и материалов для создания готовой продукции.

Таблица 4.5 Сырье и материалы

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед. руб.	Сумма
ферросиликохром	кг	20	300	6000
Азот газообразный	л	80	40	3200
Сетка металлическая	м	5	320	1600
Вольфра-рениевая проволока	кг	0,1	16000	1600
Итого за материалы:				12400

4.3.2 Расчет амортизации специального оборудования

Расчет сводится к определению амортизационных отчислений, так как оборудование было приобретено до начала выполнения данной работы и эксплуатировалось ранее, поэтому при расчете затрат на оборудовании учитываем только рабочие дни по данной теме.

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации: рассчитывается по формуле:

$$H_A = \frac{1}{n}, \quad (4.5)$$

где n – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация оборудования рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{H_A I}{12} \cdot m, \quad (4.6)$$

где I – итоговая сумма, тыс. руб.; m – время использования, мес.

Для имеющегося экспериментального оборудования необходимо рассчитывать величину годовой амортизации следующим образом:

$$A_{\text{год}} = \frac{C_{\text{перв}}}{T_{\text{пи}}} \quad (4.2),$$

где $C_{\text{перв}}$ – начальная стоимость, руб;

$T_{\text{пи}}$ – время полезного использования, год.

Результаты расчетов приведены в табл. 4.6

Таблица 4.6 Расчет затрат на оборудование

№	Наименование оборудования	Количества оборудования,	Цена единицы оборудования, руб.	Сумма амортизационных отчислений, руб.
1	Сушильный шкаф	1	54000	2400
2	СВС- реактор	1	630000	48461
3	Трансформатор	1	30000	2000
4	Компьютер	1	24000	2400
	Итого			55261

4.3.3 Основная заработная плата исполнителей научно-исследовательской работы

Величина расходов заработной платы инженера и руководителя определяется, исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} \quad (4.3),$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата $Z_{осн}$ руководителя (лаборанта, инженера) рассчитывается:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p \quad (4.4),$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата одного работника;

$Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.

Среднедневная заработная плата:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} \quad (4.5),$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно –технического персонала, раб. дн.

Месячный оклад работника рассчитывается по формуле 4.6:

$$Z_m = Z_{ок} \cdot k_p \quad (4.6),$$

где $Z_{ок}$ – заработная плата по оклад ставке, руб.;

k_p – районный коэффициент (для Томска – 1,3).

В таблице 4.7 показан общий баланс рабочего времени работника.

Таблица 4.7 Баланс рабочего времени за 2023 год

Показатели рабочего времени	Руководитель	Магистрант
Календарное количество дней	365	365
Количество нерабочих дней выходные дни: праздничные дни:	118	118
Потери рабочего времени: отпуск	48	48
невыходы по болезни	0	0
Действительный годовой фонд рабочего времени	200	224

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{\text{окл}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_d) \cdot k_p \quad (4.7),$$

где $Z_{\text{окл}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (30% от $Z_{\text{окл}}$);

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5;

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Расчёт основной заработной платы приведён в табл. 4.8

Таблица 4.8 Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_{\text{окл}}$, руб.	k_p	$k_{\text{пр}}$	k_d	Z_m , руб.	$Z_{\text{дн}}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{\text{осн}}$, руб.
Руководитель	33664	1,3	-	0,2	50327,68	2617,04	11	28787,44
Магистрант	1906	1,3	-		2477,8	115,07	55	6328,85
Итого	35116,29							

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле

(4.8):

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}, \quad (4.8)$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Общая заработная плата исполнителей представлена в таблице 4.9

Таблица 4.9 Общая заработная плата исполнителей НТИ

Исполнители	$Z_{\text{осн}}$, руб.	$Z_{\text{доп}}$, руб.	$Z_{\text{зп}}$, руб.
-------------	-------------------------	-------------------------	------------------------

Руководитель	28787,44	4318,11	33105,55
Инженер	6328,85	949,33	7277,33
Итого:			40382,88

4.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (4.9)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений во внебюджетные фонды.

Установлено, что отчисления для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность имеют коэффициент отчислений 27,1%. Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 Отчисления во внебюджетные фонды.

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Верещагин В.И.	28787,44	4318,11
Болгару К.А.	6328,85	949,33
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271	
Итого:	10943,76	

4.3.5 Накладные расходы

Величина накладных расходов определяется по формуле:

Накладные расходы включают в себя следующие расходы: печать ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи и т.д. Сумма 5 статьи затрат, рассчитанных выше, приведена в таблице ниже и используются для расчета накладных расходов.

Таблица 4.11 – Группировка затрат по статьям

Статьи					
1	2	3	4	5	6
Амортизация	Сырье, материалы	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов

55261	12400	35116,29	5267,44	10943,76	23797,7
-------	-------	----------	---------	----------	---------

Величина накладных расходов определяется по формуле (4.16):

$$Z_{накл} = (\text{сумма статей} 1 \div 5) \cdot k_{np}, \quad (4.16)$$

где k_{np} – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величина коэффициента принимается равной 0,2.

4.3.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

На основании полученных расчетов по вышеперечисленным затратам составляется калькуляция плановой себестоимости (таблице 4.12)

Таблица 4.12 Группировка затрат по статьям

Статья						Итого плановая себестоимость, рублей
Сырье, материал, покупные изделия, полуфабрикаты, рублей	Специальное оборудование, рублей	Основная заработная плата, рублей	Дополнительная заработная плата, рублей	Отчисления на социальные нужды, рублей	Накладные расходы, рублей	
12400	55261	40382,88	5267,44	10943,76	4759,53	129014,61

4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Оценка абсолютной эффективности исследования.

Для определения эффективности исследования рассчитан интегральный показатель эффективности научного исследования путем определения интегральных показателей финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} \quad (4.10)$$

где I – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{\max} – максимальная стоимость исполнения научно- исследовательского проекта.

В качестве аналогов данной работы представлены:

- 1) Композиционные материалы на основе FeCr-CrN для раскисления стали ($\Phi_{\text{исп.1}}$);
- 2) Азотированный феррохром для легирования сталей. ($\Phi_{\text{исп.2}}$).

$\Phi_{\text{текущ.проект}} = 129014,61$ руб, $\Phi_{\text{исп.1}} = 100631,39$ руб, $\Phi_{\text{исп.2}} = 114823,00$ руб.

$$I_1 = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\max}} = \frac{100631,39}{129014,61} = 0,78$$

$$I_2 = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\max}} = \frac{114823,00}{129014,61} = 0,89$$

$$I_3 = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\max}} = \frac{129014,61}{129014,61} = 1$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить как суммарное произведение весового коэффициента и бальной оценки:

$$I_{pi} = \sum(a_i \cdot b_i), \quad (4.12)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Результаты сравнительной оценки характеристик представлены в таблице 4.13.

$$I_{p\text{-исп1}} = (0,2 \cdot 5 + 0,2 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5) = 4,2$$

$$I_{p-исп2} = (0,2 \cdot 3 + 0,2 \cdot 4 + 0,1 \cdot 5 + 0,1 \cdot 3 + 0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 3 + 0,2 \cdot 4) = 3,7$$

$$I_{p-исп3} = (0,2 \cdot 5 + 0,2 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5) = 4,0$$

Таблица 4.13 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта.

Объект исследования / Критерий	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Исп. 2	Исп. 3
1. Время производства	0,2	5	3	5
2. Микротвердость	0,2	4	4	4
3. Модуль Юнга	0,1	4	5	4
4. Прочность	0,1	5	3	4
5. Общая пористость	0,1	5	4	4
6 Конкурентоспособность продукта	0,1	5	3	4
7. Цена	0,2	5	4	5
Итого:	1	4,2	3,7	4,0

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.i} = I_{p-исп.i} / I_i \quad (4.13)$$

Из расчетов выявлено, что текущий проект по интегральному показателю ресурсоэффективности вариантов является выгодным и превосходит аналоги.

Таблица 4.14– Сравнительная эффективность разработки

№	Показатели	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки, $I_{финр}$	0,78	0,89	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки, I_p	4,2	3,7	4,2
3	Интегральный показатель эффективности, I	5,38	4,15	4,0
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,77	0,74

Выводы по разделу

В результате выполнения целей раздела можно сделать следующие выводы:

1. Результатом анализа конкурентных технических решений является

выбор одного из вариантов реализации НИР как наиболее подходящего и оптимального по сравнению с другими.

2. В ходе планирования для руководителя и инженера был разработан график реализации этапа работ, который позволяет оценивать и планировать рабочее время исполнителей. Определено следующее: общее количество дней, в течение которых работал инженер, составляет 55 дней; общее количество дней, в течение которых работал руководитель, составляет 11 дней;

3. Для оценки затрат на реализацию проекта разработан проектный бюджет, который составляет 129014,61 руб;

4. Результат оценки эффективности ИР показывает следующие выводы:

1) значение интегрального финансового показателя ИР составляет 0,78, что является показателем того, что ИР является финансово выгодной по сравнению с аналогами;

2) значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 4,2 по сравнению с 3,7 и 4,2;

3) значение интегрального показателя эффективности ИР составляет 5,38 по сравнению с 4,15 и 4,0 и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в ИР, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

Список публикаций

1. **Bolgaru K.** Combustion synthesis of porous ceramic β - Si_3N_4 -based composites with the use of ferroalloys / K. Bolgaru, A. Reger, V. Vereshchagin et al. // **Ceramics International**. – 2021. – Vol. 47. - Issue 24. –P. 34765-34773.
2. **Bolgaru K.** Facile synthesis of porous g- $\text{C}_3\text{N}_4/\beta$ -SiAlON material with visible light photocatalytic activity / A. Akulinkin, K. Bolgaru, A. Reger // **Materials Letters**. – 2021. – Vol. 305. – P. 130788.
3. **Болгару К.А.** Синтез сиалонсодержащей композиции на основе ферросиликоалюминия и наноразмерного микрокремнезема в режима горения /К. А. Болгару, А. А. Регер, В. И. Верещагин // **Новые огнеупоры**. – 2023. - № 1. – С. 26-30.
4. **Bolgaru K.** Combustion synthesis of β -SiAlON from a mixture of aluminum ferrosilicon and kaolin with nitrogen-containing additives using acid enrichment / K. Bolgaru, A. Reger, V. Vereshchagin et al. // **Ceramics International**. 2023. – Vol. 49. - Issue 2. – P. 2302-2309.
5. **Bolgaru K.** Nitriding of Mechanically Pre-Activated Ferrochromaluminium in the Combustion Mode / A. Reger and K. Bolgaru // **7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE)**. 2020. P.1115-1117
6. Bolgaru K. Nitriding of ferrochromium-aluminum during combustion and evaluation of the photocatalytic activity of obtained composites / K.A. Bolgaru, A.A. Reger and L.N. Skvortsova **IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.** 2019