

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: *Материаловедение и технологии материалов*

Отделение материаловедения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Особенности структурного состояния в объеме частицы при высокоскоростном соударении с твердой поверхностью

УДК 621.793.7:539.2:539.12

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ6В	Югова Ирина Сергеевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ ТПУ	Зенин Борис Сергеевич	Кандидат физико- математических наук, доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСНГ ШБИП ТПУ	Петухов Олег Николаевич	Кандидат экономических наук, доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОКД ИШНКБ ТПУ	Раденков Тимофей Александрович			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
22.04.01 Материаловедение и технологии материалов	Панин Сергей Викторович	Доктор технических наук, профессор		

Томск – 2018 г.

Планируемые результаты обучения по ООП 22.04.01

Код результата	Результат обучения
P1	Осуществлять сбор, анализ и обобщение научно-технической информации в области материаловедения и технологии материалов с использованием современных информационно-коммуникационных технологий, глобальных информационных ресурсов
P2	Работать с патентным законодательством и авторским правом при подготовке документов к патентованию и оформлению ноу-хау
P3	Выполнять маркетинговые исследования и анализировать технологический процесс как объекта управления, разрабатывать технико-экономическое обоснование инновационных решений в профессиональной деятельности
P4	Руководить коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
P5	Внедрять в производство технологии получения керамических, металлических материалов и изделий, в том числе наноматериалов, быть готовым к профессиональной эксплуатации современного оборудования и приборов, позволяющих получать и диагностировать материалы и изделия различного назначения
P6	Разрабатывать новые и модернизировать существующие технологии получения керамических, металлических материалов и изделий, в том числе наноматериалов
P7	Внедрять системы управления качеством продукции в области материаловедения, эксплуатировать оборудование, позволяющее диагностировать материалы и изделия из них, в том числе наноматериалы
P8	Действовать в нестандартных ситуациях, нести социальную и этическую ответственность за принятые решения, выбирать наиболее рациональные способы защиты и порядка в действиях малого коллектива в чрезвычайных ситуациях
P9	Общаться в устной и письменной формах на государственном языке РФ и иностранном языке для решения задач профессиональной деятельности, подготавливать и представлять презентации планов и результатов собственной и командной деятельности, формировать и отстаивать собственные суждения и научные позиции
P10	Самостоятельно осваивать новые методы исследования, изменять научный, научно-педагогический и производственный профиль своей профессиональной деятельности
P11	Применять принципы рационального использования природных ресурсов, основные положения и методы социальные, гуманитарные и экономические подходы при решении профессиональных задач с учетом последствий для общества, экономики и экологии
P12	Использовать основные категории и понятия общего и производственного менеджмента в профессиональной деятельности

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

Инженерная школа новых производственных технологий

Отделение материаловедения

Направление подготовки: *Материаловедение и технологии материалов*

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП
_____ С.В. Панин
(Подпись) (Дата)

**ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ6В	Юговой Ирине Сергеевне

Тема работы:

Особенности структурного состояния в объеме частицы при высокоскоростном соударении с твердой поверхностью
--

Утверждена приказом директора ИШ НПТ	Приказ № _____ от _____
--------------------------------------	-------------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объекты исследования: напыляемые материалы – Al, Ni, Mo, Fe₈₃B₁₅Si₂; материалы основы – Al₂O₃, ст20</p>
---	---

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> · Обзор литературы; · Описание компьютерной программы «Cristall»; · анализ полученных результатов; · социальная ответственность; · финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение; · заключение.
--	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Петухов О.Н., доцент ОСГН ШБИП ТПУ
Социальная ответственность	Раденков Т.А., ассистент ОКД ИШНКБ ТПУ
Иностранный язык	Парнюгин А.С., доцент ОИЯ ШБИП ТПУ

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Литературный обзор

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
--	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ ТПУ	Зенин Борис Сергеевич	к. ф.-м. н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ6В	Югова Ирина Сергеевна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ6В	Югова Ирина Сергеевна

Школа	Новых производственных технологий	Отделение	Материаловедения
Уровень образования	Магистр	Направление	22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость сырья и материалов Размер окладов и выплат исполнителям проекта
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Согласно проектной документации
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления во внебюджетные фонды

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Разработка анализа конкурентоспособности
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Планирование работ; построение иерархической структуры ВКР
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	Оценка сравнительной и финансовой эффективности

Перечень графического материала:

1. <i>Матрица SWOT</i>	
2. <i>График проведения и бюджет научного исследования</i>	
3. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности научного исследования</i>	

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Петухов Олег Николаевич	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ6В	Югова Ирина Сергеевна		

Реферат

Выпускная квалификационная работа – 96 страниц, 22 рисунка, 28 таблиц, 51 литературный источник, 1 приложение.

Ключевые слова: газотермическое напыление, сплэт, структура покрытия, нанесение покрытий, аморфизация, аморфизирующийся сплав.

Объектами исследования являются напыляемые материалы – Al, Ni, Mo, $Fe_{83}B_{15}Si_2$ и материалы основы – Al_2O_3 , ст20.

Цель работы – рассмотрение особенностей структурного состояния материалов в объеме частицы после ее взаимодействия с поверхностью основы при газотермическом напылении.

В процессе исследования проводилось моделирование взаимодействия частицы с подложкой и анализировалось влияние теплофизических характеристик материалов частицы и подложки на скорость охлаждения частицы.

В результате исследования установлено, что для всех исследуемых материалов в объеме сплэта можно выделить 3 зоны (высокая, средняя и низкая скорости охлаждения), которые могут соответствовать образованию аморфной, нанокристаллической и кристаллической структуры.

Область применения: результаты работы могут быть использованы для создания покрытий при газотермическом напылении с уникальной структурой и особыми свойствами.

Оглавление

Введение.....	9
1 Общая характеристика методов газотермического напыления покрытий (ГТН)	12
1.1 Определение метода ГТН.....	12
1.2 Технологическая схема процесса ГТН	12
1.3 Порошки, применяемые для получения покрытий методом ГТН.....	13
1.4 Адгезия и когезия покрытий	15
1.5 Применение ГТН на практике	17
1.5.1 Восстановление изношенных деталей.....	18
2 Развитие технологий напыления покрытий из порошков	19
2.1 История метода получения покрытия из потока расплавленных частиц ..	19
2.2 Методы газотермического напыления покрытий.....	20
2.2.1 Плазменное напыление.....	20
2.2.2 Газопламенное напыление	22
2.2.3 Детонационно-газовое напыление	24
2.2.4 Электродуговая металлизация	26
3 Теплофизические условия взаимодействия напыляемой частицы с поверхностью.....	28
3.1 Два подхода к описанию процесса формирования газотермических покрытий	29
3.2 Механизм взаимодействия напыленной частицы с основой.....	32
4 Аморфные материалы.....	35
5 Объекты и методы исследования	37
5.1 Компьютерная программа Cristall	37

6	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	40
6.1	SWOT-анализ.....	40
6.2	Планирование научно-исследовательских работ	42
6.2.1	Структура научно-исследовательских работ	42
6.2.2	Разработка графика научного исследования.....	42
6.2.3	Бюджет научно-технического исследования	48
6.3	Определение сравнительной эффективности исследования	52

Введение

К деталям машин в зависимости от их назначения предъявляются определенные требования по свойствам, таким как износостойкость, жаростойкость, коррозионная стойкость и др.

Свойства поверхностей деталей и конструктивных элементов – твердость, износостойкость, жаростойкость, коррозионная стойкость при высоких температурах – оказывают большое влияние на надежность и срок службы. Улучшить их можно с помощью образования слоев на поверхностях деталей. Повышение этих свойств способствует экономии ресурсов, производительности труда в различных отраслях промышленности и позволяет сократить потребление энергии. Существуют различные методы упрочнения поверхности, такие как диффузионное насыщение, цементация, азотирование, наплавка, плакирование и т.д. [1].

Данная работа посвящена газотермическому напылению. Этот метод имеет следующие технологические возможности [2].

1. Покрытия можно наносить на детали любых размеров (трубопроводы, мосты, строительные конструкции, котлы, коленчатые валы, лопатки турбин и др.)

2. Толщина покрытия может достигать 10 и более миллиметров.

3. Покрытие может иметь заданную пористость.

4. В качестве покрытия можно использовать любой материал, имеющий точку плавления или интервал размягчения.

5. В качестве основного материала могут быть использованы дерево, стекло, пластмассы, керамика, композиционные материалы, металлы.

6. Нанесение покрытий может производиться в условиях широкого диапазона температуры и давления среды – от динамического вакуума в специальной камере и атмосферы воздуха до подводного напыления.

Метод газотермического напыления заключается в нагреве частиц, их распылении и ускорении газовым потоком. Частицы, поступающие на

поверхность формирования покрытия, должны обеспечивать образование прочных межатомных связей в процессе взаимодействия, для чего необходим их нагрев и соответствующая скорость. Температура частиц обуславливает термическую активацию в области контакта; скорость частиц при ударе о поверхность создает условия для механической активации поверхностного взаимодействия. При высоких скоростях частиц в момент их контакта часть кинетической энергии преобразуется в тепловую, что также способствует развитию термической активации. Газотермические методы напыления широко применяются для нанесения покрытий различного назначения. К основным достоинствам можно отнести высокую производительность процесса при удовлетворительном качестве покрытий [3].

Увеличение скорости напыляемых частиц способствует повышению качества покрытий, поскольку способствует ускорению физико-химических процессов в контакте. За счет этого улучшаются такие характеристики, как прочность и плотность покрытия [4].

Существуют аморфные металлические сплавы с неупорядоченным расположением атомов в пространстве, которые называют аморфными металлическими стеклами. Открытие этих сплавов внесло большой вклад в науку. Известно, что такие материалы значительно отличаются по своим свойствам от кристаллических материалов, для которых характерно упорядоченное расположение атомов. Аморфная структура характеризуется отсутствием дальнего порядка в расположении атомов, поэтому в ней нет кристаллической анизотропии, границ зерен и других дефектов структуры. Следствием этого являются необычные магнитные, механические, электрические свойства – высокая твердость и прочность при растяжении, близкий к нулю коэффициент термического расширения, высокое удельное сопротивление [5].

Для получения аморфной структуры необходимо провести сверхбыструю закалку из жидкой и паровой фазы, атомное осаждение из раствора или электролита или высокоэнергетическое воздействие на

кристаллическую структуру твердого тела [6]. При газотермическом напылении условия, необходимые для появления аморфной структуры – высокие скорости охлаждения – появляются автоматически.

Целью данной работы является рассмотрение особенностей структурного состояния в объеме частицы после ее взаимодействия с поверхностью материала основы при газотермическом напылении.

Для достижения данной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- освоить методику расчета температурно-временного поля в объеме напыленной частицы при ее взаимодействии с основой;
- освоить методику определения скорости охлаждения в произвольной точке объема напыленной частицы;
- провести анализ влияния теплофизических характеристик материалов частицы и подложки на скорость охлаждения частицы.

Объектом исследования является процесс формирования покрытия на основе взаимодействия отдельной частицы с поверхностью подложки.

Предметом исследования является оценка влияния теплофизических характеристик материалов частицы и подложки на скорость охлаждения частицы.

Научная новизна данной работы заключается в создании новой модели, рассматривающей деформированную частицу с учетом трех зон.

Результаты работы могут быть использованы для создания покрытий при газотермическом напылении с уникальной структурой и особыми свойствами.

1 Общая характеристика методов газотермического напыления покрытий (ГТН)

1.1 Определение метода ГТН

Метод газотермического напыления – процесс, основанный на нагреве, диспергировании и переносе конденсированных частиц распыляемого материала высокотемпературным потоком газа и формировании на основе слоя этого материала. Напыляемый материал переносится струей к подложке и подлетает к ней в виде мелких расплавленных частиц, которые ударяются об нее, деформируются, закрепляются на ее поверхности и, накладываясь друг на друга, образуют слоистое покрытие [4,7].

Очаги схватывания возникают во время удара, деформации и затвердевания частицы, их количество и размер определяются технологическим режимом и уровнем взаимодействия материалов в контакте. Чем больше площадь очагов схватывания, тем выше прочность сцепления покрытия с подложкой. Нагрев газового потока может проводиться различными методами. Широко применяется высокоскоростной поток газов, образовавшихся в результате реакции окисления горючего газа с кислородом. Используются такие горючие газы как пропан, ацетилен, пропилен, водород, природный газ. Такой метод называется газопламенным напылением, процесс осуществляется с помощью специальных газовых горелок. При использовании в качестве источника нагрева электрической дуги газ, идущий между электродами, ионизируется, что приводит к возникновению пламенного факела. Данный метод называется плазменным напылением, а процесс напыления осуществляют с помощью плазматронов. Эти методы позволяют напылять покрытия практически из любых материалов и сплавов [8].

1.2 Технологическая схема процесса ГТН

Во всех газотермических методах материал покрытия нагревается, разделяется и ускоряется в высокотемпературном потоке. В

высокотемпературный источник нагрева, напыляемый материал подается в виде порошка или проволоки. На рисунке 1 представлена схема процесса газотермического нанесения покрытий.

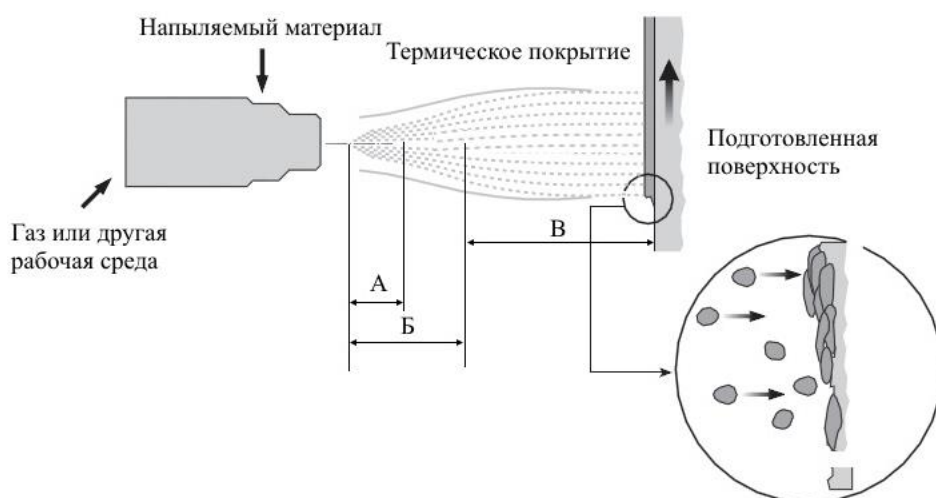


Рисунок 1 – Схема процесса газотермического нанесения покрытий:
А – расстояние, на котором происходит нагрев напыляемого материала; Б – расстояние, на котором частицы ускоряются газовым потоком; В – область свободного движения частиц [4]

При напылении частицы плавятся, испаряются и вступают в химическое взаимодействие с нагретым газом и окружающей средой. Удар и деформация частиц приводят к их быстрой кристаллизации и охлаждению со скоростями, достигающими 10^6 - 10^8 К/с. Достоинством технологии газотермического напыления является возможность регулирования в процессе напыления состава материала и структуры покрытия (кристаллической, мелкокристаллической или аморфной), которая позволяет придать покрытию особые свойства [4].

1.3 Порошки, применяемые для получения покрытий методом ГТН

Такие характеристики как форма, гранулометрический состав, сыпучесть порошков оказывают влияние на технологические параметры процесса напыления и свойства покрытий.

Применение мелкодисперсного порошка способствует увеличению плотности напыляемого покрытия. При напылении порошка, состоящего из

частиц разного размера, однородность покрытия нарушается из-за различия между частицами по степени расплавления и скорости их движения при напылении.

Ниже представлены примеры порошков металлов и сплавов, используемые для получения покрытий методом газотермического напыления [1,10,11].

1 Алюминий применяется для защиты металлов от коррозии, так как при нагреве за счет диффузии алюминия в основной металл образуется прочный слой, устойчивый к окислению при высокой температуре. Также порошок алюминия используется для создания электропроводного покрытия.

2 Цинк и сплавы цинка с алюминием также применяются в качестве антикоррозионных покрытий.

3 Молибден используется в качестве подслоя перед последующим нанесением на него желаемого покрытия. Пригоден для повышения износостойкости и коррозионной стойкости к соляной кислоте.

4 Вольфрам применяется для жаростойкости и защиты от коррозии при работе деталей в агрессивных средах. Имеет хорошее сцепление с керамическими поверхностями.

5 Нихром применяется в качестве антикоррозионного, жаростойкого и износостойкого покрытия. При напылении керамики нихромовое покрытие может быть использовано как подслоем.

6 Титан – коррозионностойкие покрытия.

7 Никель – покрытия для восстановления и ремонта деталей, износо- и коррозионностойкие покрытия.

Для напыления также используют плакированные порошки, частицы которых состоят из ядра – основы размером от нескольких микрометров до нескольких десятков микрометров, окруженного плакирующим слоем второго компонента.

Плакированные порошки могут быть получены из различных материалов. В случае напыления отдельных компонентов порошка, входящих в

состав покрытия, оно может разрушиться из-за отсутствия должного сцепления между составляющими, в то время как при использовании плакированного порошка опасность такого разрушения отсутствует. Напыление плакированным порошком также способствует повышению термо- и износостойкости.

Композиционное покрытие сочетает в себе свойства всех составляющих. Например, плакированный порошок, в составе которого имеется никель и графит, обеспечивает создание покрытия с хорошей обрабатываемостью резанием и стойкости к эрозионному износу. Покрытие, содержащее Ni, Cr и Al обладает стойкостью к окислению в воздушной среде при высокой температуре. Также оно пригодно для нанесения в качестве подслоя под керамику. Композиционное покрытие, состоящее из молибдена и алюминия, применяется для нанесения покрытий на поверхности подшипников скольжения и реставрации деталей из стали. При этом оно обладает высокой износостойкостью.

Напыление покрытий из самофлюсующихся сплавов позволяет получить слои без пор и с высокой плотностью. Самофлюсующиеся сплавы представляют собой сплавы на основе никеля или кобальта, которые содержат добавки бора и кремния. Покрытия из этих сплавов имеют высокую износостойкость и коррозионную стойкость при высоких температурах.

1.4 Адгезия и когезия покрытий

Взаимодействие материала напыленной частицы с материалом основы можно представить в виде стадий:

- 1) Сближение материалов до образования контакта между ними – на расстояние близкое к величине параметра решетки;
- 2) Активация контактирующих поверхностей и химическое взаимодействие материалов на границе раздела фаз;
- 3) Взаимное проникновение материалов частицы и основы вследствие диффузионного массопереноса.

Длительность взаимодействия составляет около 10^{-6} с, после этого частицы кристаллизуются. За такое время проникновение материалов происходит на небольшую глубину и мало влияет на прочность сцепления частиц. Приваривание частиц определяется тем, насколько полно проходит химическая стадия. Внешним проявлением степени развития этой стадии является заполнение поверхности контакта очагами схватывания. Стадия физического контакта не лимитирует взаимодействия, поскольку под действием удара расплавленные частицы быстро растекаются и придавливаются к поверхности за счет кинетической энергии. После того, как прошли первые две стадии, диффузионное проникновение материалов частицы и основы происходит по дислокациям, малоугловым границам зерен и другим дефектам структуры. Диффузия значительно облегчается пластической деформацией, происходящей в зоне контакта при соударении частиц с материалом основы. Также этим процессам способствует высокая температура в приконтактной области [4, 12].

Структура плазменного газотермического покрытия имеет слоистый характер и состоит из дискообразных кристаллитов, расположенных вдоль поверхности конструкционного материала, границ между кристаллитами и микропустот. Вертикальные границы кристаллитов ограничены материалом других дискообразных кристаллитов. Поэтому покрытие не имеет сквозных пор, а процентное содержание составляет от 2 до 12%. Такие покрытия обеспечивают эффективную защиту конструкционных материалов от коррозии.

Адгезионная и когезионная прочности плазменных покрытий определяются площадью поверхности частиц, на которой произошло химическое взаимодействие с контактируемой поверхностью, и степенью этого химического взаимодействия. Учитывая, что средняя температура покрытия в процессе напыления обычно не превышает 200-300 °С, основным периодом времени образования химических связей являются промежутки времени ударного взаимодействия и последующего деформирования каждой нагретой напыляемой частицы. При этом площадь поверхности, на которой образуются

химические связи, является площадью контакта частицы с нижерасположенным слоем [13]. В работе Кудинова В.В. было установлено, что схватывание протекает не по всей площади контакта сплэта с поверхностью материала основы, а по определенному участку, и это схватывание неравномерное [11]. Следовательно, прочность связи каждой отдельной частицы в значительной мере зависит от деформации напыляемой частицы или величины контактной площади дискообразного кристаллита.

1.5 Применение ГТН на практике

Газотермическое напыление используется в различных отраслях промышленности [14]:

- ракетостроение (головки и сопла ракет);
- строительство косметических объектов (обтекатели реактивных снарядов, аппараты для космических исследований);
- самолетостроение (лопатки турбины и компрессора реактивного двигателя, лопатки газовых турбин, несущие конструкции крыльев и фюзеляжа);
- машиностроение (прессформы для литья под давлением, разъемные и неразъемные матрицы для прессования, направляющие станков, трубчатые металлоконструкции, режущий и абразивный инструмент, измерительный инструмент);
- энергетика (топливные элементы, внутренняя и наружная поверхность уранового сердечника, тепловыделяющего элемента ядерного реактора, датчики контрольных устройств);
- металлургия (дроссельные заслонки доменных печей, диски электропил, графитовые тигли для плавки плутония и урана, автоклавы для выщелачивания никелевых руд);
- нефтяная и угольная промышленность (рабочие колеса, детали буровых насосов для гидродобычи угля, рабочий инструмент машин для

обработки почвы, ковши экскаваторов и транспортеры, днища поршней и поверхность камер сгорания);

- электроника (конденсаторы постоянной и переменной емкости, конденсаторы печатных схем, термисторы).

1.5.1 Восстановление изношенных деталей

Восстановление изношенных деталей – сложный технологический процесс, при котором в отличие от производства новых деталей в качестве заготовки используется изношенная, но уже сформированная деталь.

Восстановление изношенных деталей машин методами газотермического напыления является одним из наиболее перспективных современных технологических способов защиты изделий от износа и коррозии [15].

Эти методы имеют следующие преимущества:

- ограниченное тепловое воздействие и небольшие деформации детали;
- минимальная глубина проплавления обеспечивает незначительное перемешивание основного металла с металлом покрытия и позволяет получать физико-механические свойства покрытий, близкие к свойствам наплавочного порошкового материала;
- нанесение на изношенную деталь порошков различных составов и получения покрытий с заданными физико-механическими свойствами;
- экономия материальных и энергетических средств в результате получения покрытий с минимальными припусками на последующую механическую обработку.

2 Развитие технологий напыления покрытий из порошков

2.1 История метода получения покрытия из потока расплавленных частиц

Основателем метода получения покрытия из потока расплавленных частиц является швейцарский изобретатель Макс Ульрих Шооп (1870-1956 гг.). Он впервые получил металлическое покрытие, подставив на пути жидких частиц поверхности металла, стекла и дерева. Опты проводился с помощью стационарной установки тигельного распыления.

Идея нанесения покрытий получила дальнейшее развитие. В 1909 году в Цюрихе был открыт завод по металлизации. Подача материала в виде проволоки позволила создать газопламенный проволочный распылитель, на который М.У. Шооп получил патент (1913 г.). С 1914 года он работал над электродуговым нагревателем. В результате этой работы в 1918 году появился электродуговой металлизатор. Метод нанесения покрытий с помощью распыления стали называть шоопированием. Проверка состояния стальных конструкций, на которые наносили покрытия из цинка и алюминия, показала высокую эффективность защиты.

В 1921 году М.У. Шооп получил швейцарский патент на металлопорошковое газопламенное распыление. Нанесение покрытий распылением позволило сохранить дорогие материалы, увеличить ресурс машин, создать новые материалы и технологии.

В 60-х годах в ИМЕТ им. А.А. Байкова АН СССР под руководством академика Н.Н. Рыкалина учеными Кудиновым В.В. и Шоршоровым М.Х. были проведены исследования формирования газотермических покрытий – удар, растекание, кристаллизация напыляемых частиц. В результате этих исследований была создана теория формирования газотермических покрытий. В этой теории имеются представления о контактном взаимодействии частиц при образовании покрытия; предложены критерии, позволяющие оценить термические, энергетические и физико-химические условия контактного

взаимодействия частиц, которые приводят к образованию покрытия и его прочному сцеплению с поверхностью подложки [2].

2.2 Методы газотермического напыления покрытий

Существует несколько способов газотермического напыления. Каждый метод используется в зависимости от того, какое покрытие нужно получить. Ниже представлены основные методы нанесения покрытий с помощью газотермического напыления [2].

2.2.1 Плазменное напыление

Плазменный поток широко применяется в качестве источника нагрева, распыления и ускорения частиц при нанесении покрытий. Благодаря высокой скорости и температуре, плазменная струя позволяет напылять практически любые материалы.

При плазменном напылении возможна радиальная и осевая подача распыляемого материала в виде порошка или проволоки. Используются следующие виды плазменных потоков: турбулентные, ламинарные, дозвуковые и сверхзвуковые, закрученные и незакрученные, непрерывные и импульсные.

В настоящее время плазменное напыление основывается на использовании дозвуковых и сверхзвуковых, турбулентных плазменных струй с широким диапазоном теплофизических свойств. На нагрев плазмообразующего газа расходуется около половины мощности, подводимой к распылителю. Обычно тепловой КПД распылителя составляет 0,4-0,75.

К наиболее важным теплофизическим характеристикам плазменного потока, определяющим оптимальные условия нагрева, распыления и ускорения напыляемых частиц, относятся удельная энтальпия, температура и скорость. Управление теплофизическими параметрами потока определяет технологичность процесса и его возможности.

Существуют порошковые и проволочные способы плазменного напыления. При порошковых методах большое значение имеет преобразование

мощности дуги в тепловую мощность плазменной струи. Подача порошков осуществляется в радиальном направлении в различные участки плазменного распылителя.

Плазменное напыление с распылением проволоки производится нейтральной проволокой и проволокой-анодом. Нагрев, расплавление и распыление нейтральной проволоки осуществляется плазменной струей. В случае проволоки-анода на него подается положительный потенциал источника питания дуги.

Для плазменного напыления применяют порошок со средним диаметром частиц от 10 до 200 мкм. С увеличением размера частиц их труднее нагреть до температуры плавления. При этом резко снижается эффективность процесса. При проволочных способах плазменного напыления используют проволоку диаметром 0,8-2,5 мм. Увеличение диаметра проволоки приводит к возрастанию среднего размера распыляемых частиц.

Оптимальное расстояние для плазменного напыления в зависимости от режима работы плазматрона составляет 50-300 мм. Малые дистанции напыления, близкие к длине начального участка плазменного потока, не всегда обеспечивают прогрев частиц порошка и придание им необходимой скорости. С увеличением дистанции на основном участке потока резко падает его температура и скорость.

К параметрам плазменного потока, зависящим от режима процесса, относятся:

- среднемассовая температура, энтальпия и скорость плазменной струи на срезе сопла распылителя;
- длина начального участка плазменного потока;
- длина высокотемпературного участка плазменной струи.

Чаще всего температура напыляемых частиц близка к температуре плавления или значительно превышает ее. Повышение температуры обуславливает высокие контактные температуры на поверхности напыления, что приводит к образованию прочных адгезионных и когезионных связей. При

порошковом плазменном напылении в ряде случаев покрытия формируются с участием доли нерасплавленных частиц. Скорость напыляемых частиц находится в диапазоне от 50 до 500 м/с.

Основные преимущества метода плазменного напыления [2,3]:

- высокая производительность процесса;
- универсальность по распыляемому материалу;
- большое количество параметров, обеспечивающих гибкое регулирование процесса напыления;
- регулирование качества напыленных покрытий;
- широкая доступность метода, достаточная экономичность и невысокая стоимость оборудования.

К недостаткам можно отнести:

- наличие пористости и других видов несплошностей;
- сравнительно невысокая адгезионная и когезионная прочность покрытия;
- шум при открытом ведении процесса.

2.2.2 Газопламенное напыление

Газовое пламя получают с помощью сгорания горючих газов в кислороде. В горелках-распылителях по периферии сопла подается горючая смесь. Центральная часть предназначена для подачи в газопламенную струю распыляемого материала. Вблизи среза сопла газовое пламя представляет собой конус, по мере удаления от которого газовое пламя образует поток сплошной поток высокотемпературного газа.

Газопламенный поток как источник нагрева, распыления и ускорения при напылении покрытия подобен плазменной струе, но температура, энтальпия и скорость газопламенной струи значительно меньше. Напыляемые частицы взаимодействуют с газовой фазой сложного состава, которая состоит

из горючих газов, продуктов их сгорания, кислорода и азота. В качестве горючих газов используются ацетилен, метан, пропан, бутан и водород.

Наиболее высокая температура пламени достигается при использовании ацетилено-кислородных смесей, но теплота сгорания выше у пропана и бутана. Поэтому для напыления чаще всего применяют технический ацетилен или пропан-бутановую смесь.

Виды газопламенного напыления разделяют по следующим признакам [2.3].

1 Вид распыляемого материала – различают газопламенное напыление порошковыми и проволочными материалами.

2 Тип горючего газа – напыление с помощью ацетилена или заменителей ацетилена.

3 Степень механизации – напыление ручное и машинное. При ручных способах механизирована только подача распыляемого материала.

Размер порошковых частиц, подаваемых в газовое пламя, составляет 10-100 мкм. Подача порошка осуществляется двумя способами: в газовое пламя за счет собственного веса в сочетании с инжектированием струи или дополнительным транспортирующим газом.

К внешним условиям напыления относят дистанцию напыления, обычно она составляет 100-200 мм.

Недостатки метода газопламенного напыления:

- небольшая производительность процесса;
- наличие в потоке активных газов, взаимодействующих с металлами;
- невысокое качество покрытий из порошковых материалов;
- низкие значения эффективного КПД нагрева порошковых частиц.

К преимуществам метода можно отнести:

- наличие несложного и недорогого оборудования;
- высокие показатели коэффициента использования материала при проволочном распылении.

2.2.3 Детонационно-газовое напыление

При детонационно-газовом напылении покрытий используют специальный источник нагрева, распыления и ускорения напыляемых частиц. Он представляет собой высокоскоростной поток газовой смеси, образующейся в результате направленного взрыва, обусловленного детонацией. Детонация – процесс химического превращения взрывчатого вещества при распространении по нему детонационной волны с максимально возможной скоростью, превышающей скорость звука в этой среде. Химическое превращение обеспечивает нагрев газовой смеси, при этом резко увеличивается объем продуктов реакции. Для детонационной волны и продуктов ее распада характерны большая скорость распространения и достаточно высокая температура. Состав продуктов распада прдетонировавшей смеси определяется составом исходной газовой смеси.

Скорость протекания взрыва и теплофизические параметры продуктов реакции регулируются введением в состав горючей смеси технологических добавок. Для этого часто применяется азот и аргон. Технологические добавки также запирают каналы рабочих газов от действия взрыва и очищают камеру сгорания. От скорости продуктов детонации зависит скорость напыляемых частиц – 800-1300 м/с.

Формирование покрытия при детонационно-газовом напылении зависит от ударной пластической деформации частиц, время которой 10^{-6} - 10^{-7} с. Величина импульсного давления, возникающего в зоне соударения, определяется физическими свойствами материала. На контактной поверхности наблюдается возникновение, движение и выход дислокаций. При образовании прочных химических связей дислокации играют роль активных центров, поэтому при детонационно-газовом напылении необходимо стремиться к формированию покрытий из твердых высокопластичных частиц.

В детонационно-газовом напылении чаще всего применяются порошки. Подача порошка осуществляется в осевом и радиальном направлениях.

Несмотря на кратковременность пребывания частиц в потоке, порошковые частицы распределяются неравномерно по сечению ствола. В нижней части канала ствола наблюдается большое количество порошка, особенно крупных фракций.

Процесс детонационно-газового напыления механизирован и автоматизирован, проводится в звукоизоляционном боксе.

Методы данного вида напыления классифицируются по признакам: типу детонирующей смеси, конструктивным особенностям газового температурного такта и количеству детонационных камер-стволов.

Большое влияние на эффективность процесса оказывает диаметр порошковых частиц и их плотность, обычно используются порошки со средним размером 10-50 мкм. Более крупные частицы недостаточно разогреваются и ускоряются для образования прочных связей в момент удара.

Дозирование и подача порошка в ствол представляет собой сложный физико-химический процесс. Различают радиальную и осевую подачу порошка в непрерывном или импульсном режиме. Осевое введение обеспечивает более равномерное распределение частиц по сечению ствола. Радиальная подача позволяет в импульсном режиме вводить порошок в заданное время в заданную точку, но направление ввода порошка не совпадает с направлением движения фронта детонационной волны и горючей смеси, что затрудняет выравнивание концентрации частиц по сечению ствола.

Детонационно-газовое напыление применяется для нанесения покрытий различного назначения из многих порошковых материалов. Размер и форма детали определяются техническими возможностями устройств для напыления.

К достоинствам данного метода можно отнести [2,3]:

- высокое качество покрытий;
- увеличение усталостной прочности, вследствие образования наклепа;
- возможность напыления покрытия на холодные изделия;

- небольшой нагрев изделий при их напылении;
- высокая производительность;
- невысокая чувствительность к состоянию исходной поверхности напыления.

напыления.

К недостаткам относятся:

- трудно напылять покрытия из порошков с невысокой удельной массой;
- невозможно напыление внутренних поверхностей на глубину, превышающую диаметр входного отверстия;
- высокий уровень шума;
- необходимость использования герметичных боксов;
- высокая стоимость оборудования.

2.2.4 Электродуговая металлизация

При электродуговой металлизации образование потока напыляемых частиц происходит за счет плавления распыляемого материала высокоамперной дугой. Суть данного метода заключается в нанесении покрытий путем распыления воздухом двух расходных электропроводных проволок, между которыми возбуждается дуговой разряд. Струя сжатого воздуха переносит частицы расплавленного металла на обрабатываемую поверхность.

К особенностям дуговой металлизации относится возможность напыления только металлических материалов. С помощью этого метода можно напылять композиционные покрытия, для этого используют проволоки из различных материалов.

Метод электродуговой металлизации можно классифицировать по следующим признакам: по количеству электродных проволок (двух- и трехэлектродные способы напыления) и по механизации процесса (ручное напыление и механизированное). При ручном напылении механизирована

только подача проволоки, а при механизированном имеются устройства для перемещения распылителя относительно напыляемого изделия.

Давление, расход и свойства распыляющего газа оказывают большое влияние на эффективность процесса. Повышение давления газа и его расхода приводит к возрастанию скорости потока и его распыляющей способности. На практике давление распыляющего газа выбирается в диапазоне от 0,35 до 0,6 МПа. В качестве распыляющего газа чаще всего используется сжатый воздух.

Наиболее широко электродуговая металлизация используется при создании коррозионностойких покрытий на различных строительных сооружениях.

Преимущества данного метода [2,3]:

- высокая производительность;
- достижение высоких значений КПД напыления;
- получение качественных покрытий с высокими адгезионной и когезионной прочностью.

К недостаткам можно отнести:

- активное взаимодействие частиц с газовой средой
- использование только проволоки ограничивает возможности метода.

Качество покрытия можно улучшить, если осуществлять процесс в камере с общей защитой и распылять металл инертными газами.

3 Теплофизические условия взаимодействия напыляемой частицы с поверхностью

При нанесении покрытий частицы напыляемого материала расплавляются и ускоряются плазмой. При этом поверхность основы в зоне напыления нагревается. Контролируемый подогрев улучшает свойства покрытий и позволяет регулировать физико-химическое взаимодействие материалов основы и покрытия.

Для плазменного нанесения покрытий используются плазмотроны, в которых электрическая энергия посредством газового разряда преобразуется в тепловую и кинетическую энергию газа. Нагрев газа происходит главным образом за счет энергии, выделяющейся в столбе дуги.

Существует различие в нагреве поверхности детали частицами напыляемого материала и плазменной струей. Плазма вызывает последовательное равномерное повышение температуры поверхности в результате теплообменных процессов. Нагрев напыляемым материалом возникает вследствие сложения большого числа термических циклов частиц ударяющихся, растекающихся, затвердевающих и охлаждающихся на поверхности основы. При определении средней температуры поверхности в пятне напыления вследствие кратковременности действия теплового потока частиц нагрев напыляемым материалом может в целом трактоваться как интегральный. Однако всегда следует иметь в виду, что контактная температура между частицами и поверхностью будет гораздо выше этой средней температуры, а именно контактная температура определяет физико-химические процессы, ведущие к прочному сцеплению частиц при напылении и образованию качественного покрытия. Увеличение температуры поверхности основы одновременно повышает температуру контакта [4].

3.1 Два подхода к описанию процесса формирования газотермических покрытий

Существуют следующие подходы к описанию формирования напыленного покрытия: в случае взаимодействия отдельной частицы с основой, и в случае взаимодействия всего покрытия в целом с основой [17].

С точки зрения первого подхода рассматривается последовательное наложение частиц друг на друга. При анализе эффектов, связанных с наложением частиц, различают несколько ситуаций: наложение на полностью остывшую предыдущую частицу; наложение на не полностью остывшую, но закристаллизовавшуюся частицу; наложение на предыдущую частицу, которая еще полностью не закристаллизовалась [18, 19].

В работах [20,21] представлены результаты математического моделирования процессов теплопереноса в случае первой ситуации. В [20] рассматривается наложение частиц на идеально гладкую поверхность, в [21] – на поверхность с цилиндрическими и сферическими микровыступами. В первой из этих работ не учитывается теплота фазового перехода, частиц на стадии затвердевания рассматривается как полуограниченный массив; во второй работе учитывается теплота фазовых переходов путем введения в основное дифференциальное уравнение внутренних источников теплоты, равномерно распределенных по объему затвердевающей частицы.

Работы [22-27] посвящены тепловым аспектам напыления композиционных покрытий и получения композиционных материалов. В [22,24] рассматриваются ситуации при напылении плакированными порошками; в [23] – при совместном напылении частиц из легкоплавких и тугоплавких компонентов; в [25-27] – в условиях получения волокнистых композиционных материалов. В работе [24], рассматривающей напыление плакированными порошками, большое внимание уделяется нахождению необходимой минимальной толщины плакирующего слоя, при превышении которой не происходит отскакивание частицы от поверхности основы. В [22]

термическое взаимодействие композиционной частицы с основой анализируются с учетом конечной скорости распространения теплового возмущения. Согласно описанной в данной работе математической модели, рассмотрению подлежит слоисто-неоднородная система, состоящая из ядра частицы, основы и слоя между ними (плакирующей оболочки). Показано, что влияние плакирующей оболочки является наиболее значительным на начальной стадии процесса. В работе [23] описаны процессы теплопереноса при геотермическом напылении покрытий и приведены рекомендации относительно выбора технологических режимов. В [25-27], рассматривающих получение волокнистых композиционных материалов, особенность математического моделирования заключается в том, что основа представляет микроцилиндр, а растекшиеся частицы – тонкую кольцевую пленку на его поверхности.

В работах [28-32] рассмотрено влияние пористости порошковой основы на закономерности формирования геотермических покрытий. При этом выделяются две ситуации. Первая отвечает условиям $t_k < t_c$ (где t_k – температура кристаллизации, t_c – температура спекания порошка). Первая ситуация реализуется при нанесении покрытий из легкоплавких материалов и характеризуется отсутствием подплавления основы, вторая – при напылении тугоплавких материалов и отличается частичным проплавлением и доспеканием основы.

В большинстве исследований для решения задач теплопереноса рассматриваются различные аналитические методы. Исходя из этого, можно обозначить как достоинства, так и недостатки математического моделирования. К достоинствам можно отнести простоту получаемых аналитических выражений, относительную наглядность взаимосвязи различных характеристик процесса и, как следствие, проведения качественного и количественного анализа влияния различных параметров на искомые величины; к недостаткам относится невозможность совместного учета различных усложняющих факторов.

Далее будет представлен анализ публикаций относительно второго подхода к описанию формирования напыленного покрытия – взаимодействия всего покрытия с основой.

Что касается исследований, которые относятся к получению покрытий, выделяются три следующие ситуации: первая характеризуется наличием учета монотонного увеличения во времени толщины покрытия, вторая – дискретностью роста, третья – предпосылкой о возможности пренебрежения термическим сопротивлением покрытия.

В первой ситуации математическая модель процесса теплопроводности формулируется в приближении Л.С. Лейбензона. Это означает, что процесс напыления предполагается квазистационарным, средняя плотность потока массы от распылителя считается постоянной по поверхности основы и толщина покрытия – увеличивающейся с неизменной скоростью, профиль температуры в покрытии принимается линейным. Указанные предпосылки дают возможность нахождения температуры в основе на стадии напыления без рассмотрения процесса в покрытии, т.е. контактная задача теплопроводности здесь не рассматривается. На стадии охлаждения задача нестационарной теплопроводности решается для двухслойной системы покрытие-основа. Математические модели, в которых используются указанные предпосылки, являются одномерными.

Вторая ситуация, характеризующаяся дискретностью учета при моделировании последовательно наносимых друг на друга слоев покрытия, анализируется в [33]. Здесь формулируется трехмерная нестационарная задача теплопроводности для многослойной пластины. Распределение плотности теплового потока в пятне нагрева предполагается отвечающим закону Гаусса. Возрастание толщины покрытия после одного подхода плазматрона не учитывается. Задача ставится в линейной постановке. Для нахождения решения использовался метод конечных интегральных преобразований с применением «обобщенной» нормировки собственных функций по Г.Н. Комарову [34].

Третья ситуация, определяемая отсутствием при моделировании учета термического сопротивления покрытия, наиболее типична для электродуговой металлизации. Термическое сопротивление невелико и им можно пренебречь.

Скоростная термическая обработка газотермических покрытий лазерным или электронным лучом осуществляется с целью улучшения сцепления покрытия с основой и упрочнением покрытия.

Математическое моделирование процессов теплопроводности при высокоскоростной термической обработке газотермических покрытий электронным лучом приведено в [35]. Здесь контактная задача теплопроводности решается в приближении одномерной постановки с учетом нелинейности I рода. Воздействие электронного пучка моделируется поверхностным теплоподводом и принимается во внимание теплообмен излучением. Теплоты фазовых переходов не учитываются. В этой работе по результатам выполненных расчетов анализируется влияние пористости покрытия на тепловое состояние рассматриваемого объекта.

Анализ публикаций относительно второго подхода показал, что с аналитическими методами также широко используются и численные [35-37]. Это дает возможность учитывать при математическом моделировании различные усложняющие факторы.

3.2 Механизм взаимодействия напыленной частицы с основой

Белашенко и Кудиновым был предложен метод контактной теплопроводности для решения задачи затвердевания и охлаждения частицы в момент взаимодействия с основой [4].

Термический цикл для сферической частицы, рисунок 2, деформирующейся вследствие кинетической энергии удара и затвердевающей на поверхности основы, можно представить в виде двух этапов.

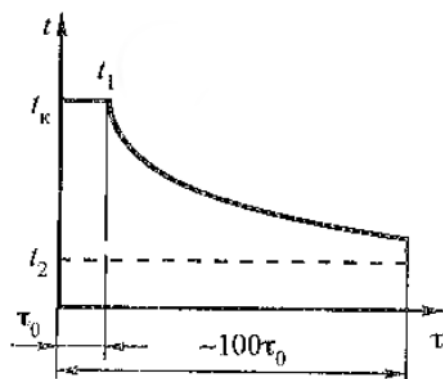


Рисунок 2 – Термический цикл сферической частицы в месте контакта с основой [4]

Первый этап заключается в затвердевании расплавленной частицы в течение времени τ_0 . При этом температура в контакте t_k остается постоянной, а над подвижным фронтом кристаллизации остается жидкая фаза. Во втором этапе происходит охлаждение затвердевшей частицы до температуры основы t_2 .

На рисунке 3 представлен процесс деформирования и затвердевания расплавленной частицы при ударе о поверхность основы.

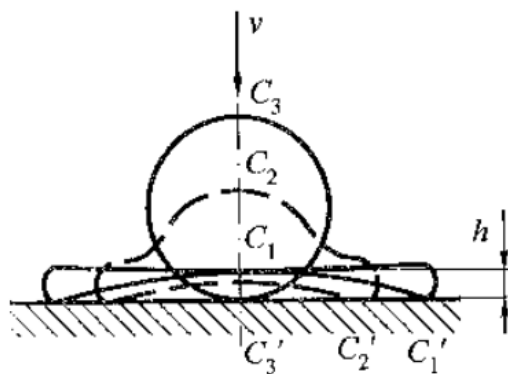


Рисунок 3 – Схема деформирования и затвердевания частицы [4]

Обозначения C_1 , C_2 и C_3 на рисунке соответствуют периодам движения жидкости при затвердевании частицы.

Проводить экспериментальные исследования, описывающие взаимодействие частицы с основой, не представляется возможным из-за кратковременности протекания термического цикла, но высокий уровень вычислительной техники в настоящее время позволяет проводить расчеты времени охлаждения и распределения температуры в частице и основе без

особых затруднений. Для расчета необходимо знать такие основные параметры как диаметр частицы D , скорость газового потока V , температура основы T_0 , удельная теплоемкость C , плотность ρ , коэффициент теплопроводности λ , температура плавления $T_{пл}$ [4].

4 Аморфные материалы

К важным достижениям последних лет в области материаловедения можно отнести разработку аморфных материалов. Характерной особенностью этих материалов является уникальное сочетание физико-химических свойств, которое не достигается в кристаллических сплавах. Поэтому такие материалы имеют большие потенциальные возможности, направленные на практическое применение.

Определяющим признаком аморфного твердого тела является отсутствие дальнего порядка во взаимном расположении составляющих его атомов [39, 40].

Выбор того или иного способа получения аморфных материалов в каждом случае определяется требованиями, которые предъявляются к геометрической форме изделия и производительности процесса. В настоящее время ввиду относительной простоты и высокой производительности широкое распространение получили технологии изготовления аморфных материалов, основанные на сверхбыстрой закалке расплава [41].

Наиболее простым способом повышения скорости закалки является увеличение площади контакта расплава с охлаждающей средой за счет быстрого увеличения удельной поверхности жидкого металла. Это достигается изменением формы расплава во время закалки или его делением на более мелкие части. В обоих случаях условия теплопередачи, при которых удается избежать кристаллизации расплава в процессе застывания, накладывают ограничения на геометрию получаемых изделий. Вследствие этого аморфные сплавы имеют форму частиц, проволок, пленок, лент и полос, а их толщина в направлении основного теплоотвода, как правило, не превышает 40–60 мкм.

Указанные размерные ограничения сужают возможный набор изделий и препятствуют широкому практическому применению этого класса материалов.

До сих пор не удается получать аморфные сплавы в виде массивных материалов, из которых можно было бы изготовить более сложные

конструкции. Во многих случаях высокие функциональные характеристики конструкционных материалов можно обеспечить более простыми и экономичными способами, например, за счет модификации их поверхности аморфными покрытиями.

К наиболее перспективным методам получения аморфных сплавов в виде массивных образцов относятся: горячее прессование, динамическое компактирование, детонационное и плазменное напыление [42].

5 Объекты и методы исследования

В данной работе в качестве модельных материалов исследовались Al, Ni, Mo (напыляемая частица) и ст20, Al₂O₃ (основа). Данные материалы для частицы, обладающие различными теплофизическими характеристиками, были выбраны для того, чтобы изучить, как влияют эти характеристики на условия формирования сплэта. Материалы основы были выбраны для того, чтобы посмотреть, как влияет теплопроводность этих основ на скорость охлаждения частицы.

В качестве реального напыляемого материала был выбран аморфизирующийся сплав Fe₈₃B₁₅Si₂. Сплавы Fe-Si-B с высоким магнитным насыщением используются в качестве замены обычного кристаллического сплава Fe-Si в сердечниках трансформаторов, а также сплавов Ni-Fe с высокой магнитной проницаемостью. Отсутствие магнитокристаллической анизотропии в сочетании с высоким электросопротивлением снижает потери на вихревые токи, в особенности на высоких частотах [43].

В таблице 1 представлены характеристики исследуемых материалов.

Таблица 1 – Теплофизические характеристики материалов

Материал	T _m , К	ρ ₀ , кг/м ³	λ, Вт/м·К	C, Дж/кг·К	L, Дж/кг·10 ³
Al	933,52	2702	196,46	903,7	393
Ni	1728	8900	72	364	305
Mo	2901	10220	93,3	320	210
Fe ₈₃ B ₁₅ Si ₂	1843	6241	36	875	313067
Ст20	-	7850	50,7	690	-
Al ₂ O ₃	-	3970	9	1247,4	-

5.1 Компьютерная программа Cristall

Анализ взаимодействия частицы с подложкой осуществлялся с помощью численного моделирования. В процессе выполнения данной работы использовалась программа Cristall, схема которой представлена на рисунке 4. Для расчетов вводятся следующие параметры: характеристики материалов, модельные параметры и технологические. В результате расчетов программа

выдает значения толщины частицы после взаимодействия с основой и температурное распределение в зависимости от времени.

В качестве входных параметров используются P_1 – материалы частицы и основы; P_2 – технологические параметры процесса напыления; P_3 – модельные параметры. Выходные параметры P_4 : температура в контакте, толщина сплэта, время полной кристаллизации частицы.

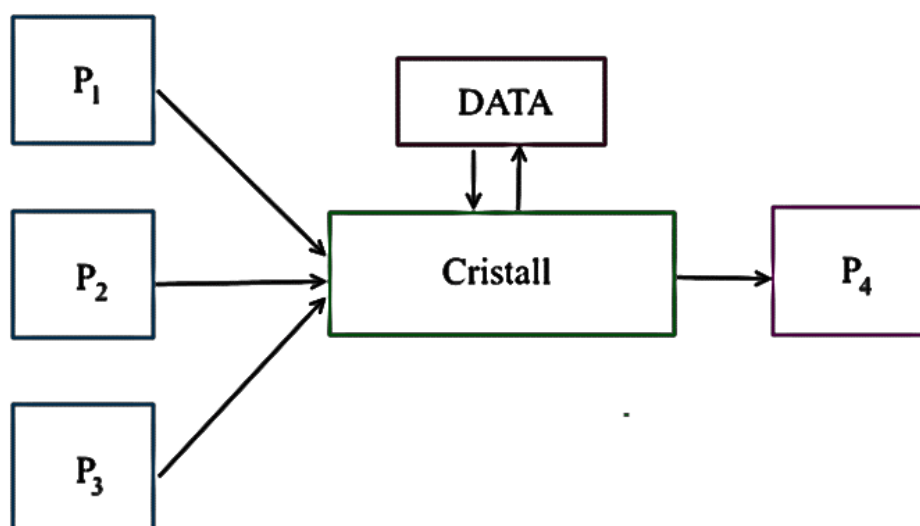


Рисунок 4 – Схема компьютерной программы Cristall: P_1 – входные параметры (материалы частицы и основы); P_2 – технологические параметры процесса напыления; P_3 – модельные параметры; P_4 – выходные параметры (температура в контакте, толщина сплэта, время полной кристаллизации частицы)

В процессе выполнения данной работы использовалась программа Cristall. Для расчетов вводятся следующие параметры: характеристики материалов, модельные параметры и технологические. В результате расчетов программа выдает значения толщины частицы после взаимодействия с основой и температурное распределение в зависимости от времени.

К входным параметрам относятся:

- ρ – плотность материалов частицы и подложки;
- C – удельная теплоемкость;
- λ – коэффициент теплопроводности;
- $T_{пл}$ – температура плавления;

- L – скрытая теплота плавления;
- α – параметр, который определяется по номограмме [25].

К модельным параметрам:

- $n_{1,2}$ – параметры, зависящие от соотношения теплопроводностей материалов частицы и основы;
- dy – количество интервалов, на которое делится толщина частицы;
- dt – количество периодов, на которое делится время полного затвердевания частицы.

К технологическим параметрам:

- D – диаметр частицы;
- V – скорость частицы;
- T_0 – температура основы.
- Полученные в результате расчета параметры:
- T_k – температура в контакте;
- t^* – время полной кристаллизации;
- x_0 – толщина частицы после соударения с основой;
- $T_a(y,t), T_b(y,t)$ – распределение температуры в объеме частицы (a) и в объеме основы (b) в различные моменты времени.

Для проведения расчета использовались модельные параметры $n_{1, 2}$ и параметр α , значения которых представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Модельные параметры $n_{1, 2}$ и α для исследуемых систем

Материал	n_1	n_2	α	Материал	n_1	n_2	α
Al/ст20	2	3	0,60	Al/Al ₂ O ₃	2	3	0,45
Ni/ст20	2	2	0,67	Ni/Al ₂ O ₃	2	3	0,56
Mo/ст20	2	2	0,74	Mo/Al ₂ O ₃	2	3	0,62
Fe ₈₃ B ₁₅ Si ₂ /ст20	2	2	0,71	-	-	-	-

6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование. Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка. Сегментом рынка называется группа потребителей, обладающих определенными общими признаками.

6.1 SWOT-анализ

SWOT-анализ представляет собой комплексный анализ внутренней и внешней среды научно-исследовательского проекта. Он проводится в несколько этапов.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде. Результаты первого этапа представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Матрица SWOT

Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1.Наличие бюджетного финансирования. С2.Квалифицированный персонал. С3.Наличие необходимого оборудования для проведения испытаний. С4.Экономичность технологии. С5.Наличие материала для исследований.	Возможности: В1.Использование инновационной инфраструктуры ТПУ. В2.Повышение производительности. В3.Спрос на результаты исследований.
Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1.Недостаточно данных для исследования. Сл2.Длительность проведения некоторых исследований. Сл3.Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство под ключ. Сл4.Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой.	Угрозы: У1.Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства. У2.Отсутствие спроса на новые технологии производства.

Второй этап заключается в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Для этого строится интерактивная матрица проекта, таблица 13.

Таблица 13 – Интерактивная матрица

Сильные стороны проекта						
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	0	+	+	+	0
	B2	–	+	+	–	+
	B3	–	+	+	–	0
Угрозы проекта	У1	+	–	0	0	+
	У2	–	–	–	0	–
Слабые стороны проекта						
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	
	B1	–	0	0	–	
	B2	+	–	+	+	
	B3	–	0	–	+	
Угрозы проекта	У1	–	+	0	–	
	У2	–	–	–	+	

На третьем этапе SWOT-анализа строится итоговая матрица, таблица 14.

Таблица 14 – SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>C1.Наличие бюджетного финансирования.</p> <p>C2.Квалифицированный персонал.</p> <p>C3.Наличие необходимых установок для проведения испытаний.</p> <p>C4.Экономичность технологии.</p> <p>C5.Наличие материала для исследований.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Недостаточно данных для исследования.</p> <p>Сл2.Длительность проведения некоторых исследований.</p> <p>Сл3.Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство под ключ.</p> <p>Сл4.Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой.</p>
<p>Возможности:</p> <p>B1.Использование инновационной инфраструктуры ТПУ.</p> <p>B2.Повышение производительности</p> <p>B3.Спрос на результаты исследований.</p>	<p>Наличие необходимых материалов и оборудования, а также персонала в процессе исследований может способствовать повышению производительности в будущем.</p>	<p>Для повышения производительности и спроса на результаты исследований необходимы квалифицированные кадры среди потенциальных потребителей.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1.Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства.</p>	<p>Основной угрозой является несвоевременное финансирование – может возникнуть нехватка материалов для</p>	<p>Вследствие несвоевременного финансирования может возникнуть приостановка исследований на некоторое</p>

У2.Отсутствие спроса на новые технологии производства.	исследований.	время.
--	---------------	--------

6.2 Планирование научно-исследовательских работ

6.2.1 Структура научно-исследовательских работ

В таблице 15 представлен перечень этапов и работ, а также распределение исполнителей по данным работам.

Таблица 15 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Выбор направления исследований	Руководитель
	3	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель, студент
Теоретические и экспериментальные исследования	4	Моделирование с помощью компьютерной программы	Студент
	5	Анализ результатов	Руководитель, студент
	6	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	Руководитель, студент
Обобщение и оценка результатов	7	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, студент
	8	Определение целесообразности проведения ОКР	Руководитель
Оформление отчета по НИР	9	Написание дипломной работы	Студент

6.2.2 Разработка графика научного исследования

Диаграмма Ганта– горизонтальный ленточный график, на котором работы представляются протяженными во времени отрезками,

характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. Для ее построения необходимо вычислить некоторые показатели, а именно ожидаемое значение трудоемкости, продолжительность работ в рабочих и календарных днях.

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования. Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости определяется следующей формулой:

$$t_{ожi} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}, \quad (1)$$

где t_{mini} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, чел.-дн.; t_{maxi} – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, чел.-дн.

При известной ожидаемой трудоемкости работ можно вычислить продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65%. Продолжительность одной работы вычисляется по формуле:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i}, \quad (2)$$

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

Для удобства построения графика длительность каждого из этапов работ из рабочих дней переводится в календарные дни. Для этого применяется следующая формула:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_k, \quad (3)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -ой работы в календарных днях; T_{pi} – продолжительность выполнения i -ой работы в рабочих днях; k_k – коэффициент календарности, который определяется как

$$k_k = \frac{T_k}{T_k - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (4)$$

где T_k – количество календарных дней в году; $T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году; $T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

В таблице 16 представлены временные показатели проведения научного исследования, рассчитанные по данным формулам.

Таблица 16 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}
	t_{min} , чел.-дни	t_{max} , чел.-дни	$t_{\text{ож}}$, чел.-дни			
Составление и утверждение технического задания	3	5	4	Руководитель	4	6
Выбор направления исследований	2	5	3	Руководитель	3	4
Подбор и изучение материалов по теме	60	90	72	Руководитель, студент	36	53
Моделирование с помощью компьютерной программы	65	100	79	Студент	79	117
Анализ результатов	30	40	34	Руководитель, студент	17	25
Сопоставление результатов экспериментов с теорией	20	35	26	Руководитель, студент	13	19
Оценка эффективности полученных результатов	7	9	8	Руководитель, студент	4	6
Определение целесообразности проведения ОКР	3	7	5	Руководитель	5	7
Написание дипломной работы	80	100	88	Студент	88	130

Пример расчета:

Ожидаемое значение трудоемкости:

$$t_{ожi} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5} = \frac{3 \cdot 3 + 2 \cdot 5}{5} = 4 \text{ чел. -дн.}$$

Продолжительность работы в рабочих днях:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{U_i} = \frac{4}{1} = 4.$$

Продолжительность работы в календарных днях:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot \frac{T_k}{T_k - T_{вых} - T_{np}} = 4 \cdot \frac{365}{365 - 104 - 14} = 6.$$

На основании данных таблицы 12 строится календарный план-график, таблица 17.

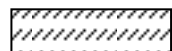
Таблица 17 – Календарный план-график

№	Вид работ	Исполнители	Т _{кi} , дн.	Продолжительность выполнения работ																																			
				июнь			июль			август			сентябрь			октябрь			ноябрь			декабрь			январь			февраль			март			апрель			май		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	6	■																																			
2	Выбор направления исследований	Руководитель	4	■																																			
3	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель, студент	53	■																																			
9	Моделирование с помощью компьютерной программы	Студент	117				■																																
10	Анализ результатов	Руководитель, студент	25													■																							
11	Сопоставление результатов эксперимента с теорией	Руководитель, студент	19																■																				
12	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, студент	6																			■																	
13	Определение	Руководитель	7																			■																	

	целесообразности проведения ОКР														
14	Написание дипломной работы	Студент	130												



– студент



– руководитель

6.2.3 Бюджет научно-технического исследования

В процессе формирования бюджета научно-технического исследования используется следующая группировка затрат: затраты на материалы для исследований и оборудование; основная и дополнительная заработная плата исполнителей работы; отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления); затраты научные и производственные командировки; контрагентные и накладные расходы.

6.2.3.1 Расчет материальных затрат

В этом разделе учитывается стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{\text{расх}i}, \quad (5)$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования; $N_{\text{расх}i}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию; C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов; k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Материальные затраты данной исследовательской работы представлены в таблице 18.

Таблица 18 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, руб.
Компьютер	шт.	1	40000	40000
Шариковая ручка	шт.	5	30	150
Тетрадь	шт.	3	60	180
Итого				40330

Пример расчета затрат на материалы:

$$Z_m = 1 \cdot 30 \cdot 5 = 150 \text{ руб.}$$

6.2.3.2 Основная и дополнительная заработная плата исполнителей темы

Основная заработная плата рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы – оклад, который определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями; стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд и выполнение дополнительных обязанностей.

В раздел включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников непосредственно участвующих в выполнении работ. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы представлен в таблице.

Полная заработная плата включает в себя основную и дополнительную (12-20 % от $Z_{осн}$):

$$Z_{зн} = Z_{осн} + Z_{доп}. \quad (6)$$

Основная заработная плата рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p, \quad (7)$$

где $Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата, руб.; T_p – продолжительность работ, раб.дн.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (8)$$

где Z_m – месячный должностной оклад, руб.; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года (при отпуске в 48 раб.дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя); F_d – действительный годовой фонд рабочего времени, таблица 19.

Таблица 19 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Количество дней
Календарное число дней	365
Количество нерабочих дней	118
Отпуск	48
Действительный годовой фонд рабочего времени	199

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p, \quad (9)$$

где $Z_{тс}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.; $k_{пр}$ – премиальный коэффициент; k_d – коэффициент доплат и надбавок; k_p – районный коэффициент (для Томска равен 1,3). $k_{пр}$ и $k_{дв}$ данной работе не учитываются.

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций.

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}, \quad (10)$$

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

Расчет основной и дополнительной заработной платы приведён в таблице 20.

Таблица 20 – Расчёт основной и дополнительной заработной платы

Исполнители	$Z_{тс}$, руб.	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.	$Z_{доп}$, руб.
Руководитель	24588	1,3	31964,4	1670,5	82	136981	16437,7
Студент	2410	1,3	3133	163,7	237	38796,9	4655,6
Итого						175777,9	21093,3

Пример расчета:

- месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = 24588 \cdot 1,3 = 31964,4 \text{ руб.};$$

- среднедневная заработная плата:

$$З_{\text{дн}} = \frac{31964,4 \cdot 10,4}{199} = 1670,5 \text{ руб.};$$

- основная заработная плата:

$$З_{\text{осн}} = 1670,5 \cdot 82 = 136981 \text{ руб.}$$

- дополнительная заработная плата:

$$З_{\text{доп}} = 0,12 \cdot 136981 = 16437,7 \text{ руб.}$$

6.2.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды – обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования, пенсионного фонда и медицинского страхования от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется следующей формулой:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}), \quad (11)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится коэффициент – 0,271.

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 21.

Таблица 21 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнители	Сумма, руб.
Руководитель	41576,5
Студент	11775,6
Итого	53352,1

Пример расчета величины отчислений во внебюджетные фонды:

$$З_{\text{внеб}} = 0,271 \cdot (136981 + 16437,7) = 41576,5 \text{ руб.}$$

6.2.3.4 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации: печать и ксерокопирование, оплата услуг связи, электроэнергии и т.д. Их величина определяется по формуле:

$$Z_{\text{накл}} = k_{\text{нр}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (12)$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы (равен 0,16).

Накладные расходы представлены в таблице 22.

Таблица 22 – Накладные расходы

Исполнители	Сумма, руб.
Руководитель	24547
Студент	6952,4
Итого	31499,4

Пример расчета накладных расходов:

$$Z_{\text{накл}} = 0,16 \cdot (136981 + 16437,7) = 24547 \text{ руб.}$$

6.2.3.5 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Затраты проекта представлены в таблице 23.

Таблица 23– Расчет бюджета затрат

Наименование	Сумма, руб.
Материальные затраты	40330
Затраты по основной заработной плате	175777,9
Затраты по дополнительной заработной плате	21093,3
Отчисления во внебюджетные фонды	53352,1
Накладные расходы	31499,4
Бюджет затрат	322052,7

6.3 Определение сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета, с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп}i} = \frac{\Phi_{ri}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (13)$$

где Φ_{ri} – стоимость i -го варианта исполнения; Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{ri} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (14)$$

где a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки; b_i – балльная оценка i -го варианта исполнения разработки.

В таблице 24 представлена сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта. За исполнение 1 принято привлечение к данной работе персонала из сторонних организаций, за исполнение 2 – использование ресурсов (спецоборудования и материалов) другого предприятия.

Таблица 24 – Сравнительная оценка характеристик

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Данный проект	Исп.1	Исп.2
Способствует росту производительности труда пользователя	0,25	5	4	3
Соответствует требованиям потребителей	0,15	4	4	5
Энергосбережение	0,2	4	3	4
Надежность	0,2	5	4	4
Материалоемкость	0,2	4	5	5
Интегральный показатель ресурсоэффективности		4,45	4	4,1

Пример расчета интегрального показателя ресурсоэффективности:

$$I_p = 0,25 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 + 0,2 \cdot 4 = 4,45.$$

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

$$I_{\text{исп}} = \frac{I_{\text{рi}}}{I_{\text{финр}}^{\text{испi}}}. \quad (15)$$

Сравнительная эффективность проекта определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{д.п.}}}{I_{\text{исп}}}. \quad (16)$$

В таблице 25 представлена сравнительная эффективность разработки.

Таблица 25– Сравнительная эффективность

№	Показатели	Данный проект	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель	1	0,9	0,88
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности	4,45	4	4,1
3	Интегральный показатель эффективности	4,45	4,44	4,67
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	–	1	0,95

Пример расчета:

- интегральный финансовый показатель:

$$I_{\text{финр}}^{\text{испi}} = \frac{21161784,6}{21161520} \cong 1;$$

- интегральный показатель эффективности:

$$I_{\text{исп}} = \frac{4,45}{1} = 4,45.$$

- сравнительная эффективность вариантов исполнения:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{4,45}{4,44} \cong 1.$$

По данным этой таблицы можно сделать вывод, что, данный проект является более эффективным по сравнению с аналогами.