

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

Институт: Институт социально-гуманитарных технологий

Направление подготовки: Материаловедение и технологии материалов

Кафедра: Материаловедение в машиностроении

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Особенности температурных условий формирования адгезионных и когезионных связей в покрытиях при газотермическом и газодинамическом напылении

УДК 621.793.7:536.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
154630	Чжао Ифань		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Зенин Б.С.	к.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Попова С.Н	к.э.н		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Штейнле А.В	к.т.н		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Материаловедение в машиностроении	Панин С.В.	д.т.н., профессор		

Томск – 2017 г.

Планируемые результаты обучения по ООП 22.03.01 Материаловедение и технологии материалов (бакалавриат)

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
P1	Применять основные положения и методы гуманитарных наук при решении социально-общественных и профессиональных задач в области материаловедения и технологии материалов
P2	Использовать современное информационное пространство при решении профессиональных задач в области материаловедения и технологии материалов
P3	Разрабатывать, оформлять и использовать техническую документацию, включая нормативные документы по вопросам интеллектуальной собственности в области материаловедения и технологии материалов
P4	Проводить элементарный экономический анализ ресурсов, технологий и производств при решении профессиональных задач в области материаловедения и технологии материалов
P5	Эффективно работать в коллективе на основе принципов толерантности, использовать устную и письменную коммуникации на родном и иностранном языках в мультикультурной среде
P6	Эффективно выполнять трудовые функции по реализации высокотехнологичных производств материалов и изделий
P7	Проводить комплексную диагностику материалов, процессов и изделий с использованием технических средств измерений, испытательного и производственного оборудования
P8	Готовность к мотивированному саморазвитию, самоорганизации и обучению для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности в области материаловедения и технологии материалов
P9	Успешно использовать методы и приемы организации труда, обеспечивающие эффективное, экологически, социально и технически безопасное производство
P10	Использовать принципы производственного менеджмента и управления персоналом в производственной деятельности в области материаловедения и технологии материалов

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

Институт: Институт социально-гуманитарных технологий
Направление подготовки: Материаловедение и технологии материалов
Кафедра: Материаловедение в машиностроении

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой
_____ Панин С. В.

ЗАДАНИЕ

На выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
154Б30	Чжао Ифань

Тема работы:

Особенности температурных условий формирования адгезионных и когезионных связей в покрытиях при газотермическом и газодинамическом напылении	
Утверждена приказом директора ИФВТ	Приказ №2048/с от 23.03.2017

Срок сдачи студентом выполненной работы:	09.06.2017
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <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>Объектом исследования является контактная температура на границе частиц-частиц и частиц-подложка при газотермическом и газодинамическом напылении. Исследуются влияние напыления на исследуемых порошков, рассмотрены вопросы социальной ответственности, проведен экономический анализ производства покрытия из исследованных материалов.</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <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.</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – Аналитический обзор по теме исследования; – Изучение морфологии исходных порошковых систем; – Изучение методики исследования;

<i>подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	– Исследование контактная температура на границе частиц-частиц и частиц-подложка при газотермическом и газодинамическом напылении; - Заключение по работе
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	– Титульный лист – Актуальность, цель работы – Материалы и методы исследования – Результаты исследований - Заключение

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	<u>Попова Светлана Николаевна</u> , Доцент, НТБ, правое крыло, т. каф.менеджмента 563-789
Социальная ответственность	<u>Штейнле Александр Владимирович</u> , Доцент, корпус № 8, ауд. 138, 140

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

1. Литературный обзор (русский язык)
2. Методики исследования (русский язык)
3. Экспериментальная часть (русский язык)
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение (русский язык)
5. Социальная ответственность (русский язык)

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	22.09.2016
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень звание	Подпись	Дата
доцент	Зенин Б.С	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
154Б30	Чжао Ифань		

РЕФЕРАТ

Ключевые слова: газотермическое напыление, газодинамическое напыление, материалы частиц, материалы подложка, адгезионная прочность, когезионная прочность, подготовка поверхности, скорость частицы, температура в контакте.

Цель работы – провести количественную оценку контактной температуры на границе частица-подложка и на границе частица-подложка из напыленных ранее частиц. Исследовать влияние скорости частиц, теплофизических характеристик материала частиц на особенности температурных условий формирования адгезионных и когезионных связей в покрытиях при газотермическом и газодинамическом напылении.

Актуальность исследования определяется тем, что изучение особенностей температурных условий формирования адгезионных и когезионных связей в покрытиях при газотермическом и газодинамическом напылении позволит решить проблему создания прочных покрытий с высокой износостойкостью, коррозионностойкостью, антифрикционной, теплостойкостью, термобарьерной характеристиками. Результаты исследования могут быть использованы при разработке технологий напыления функциональных покрытий с повышенной адгезией.

Условия получения покрытий для холодного газодинамического напыления и газотермического напыления на границе частица – подложка при разных скоростях и для разных исследованных систем – это объект исследования.

В работе проведен сравнительный анализ технологий, в которых в качестве исходного материала используются порошковые материалы. Подробно рассмотрен процесс теплового взаимодействия в системе частица-подложка. При газотермическом и газодинамическом напылении для получения покрытий с хорошим качеством очень важно учитывать энергетические условия процесса

взаимодействия напыляемой частицы с подложкой. Контактная температура на границе частицы-подложка играет важную роль в формировании адгезионных связей между покрытием и подложкой, поэтому знание численного значения температуры имеет большой практический интерес. В настоящее время используют различные методы напыления, каждому из которых присущи определенные достоинства и недостатки. Для повышения качества покрытий во многих случаях используются специальные методы активации процесса напыления.

В процессе работы проводились математические расчеты с помощью компьютерной программы EXCEL. Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2007. В работе для создания графика и гистограммы были использованы Origin 9.0.

Annotation

Keywords: thermal spraying, gas-dynamic spraying, material particles, substrate material, adhesion strength, cohesive strength, surface preparation, particle velocity, contact temperature.

The purpose of the paper is to quantify the contact temperature at the particle-substrate boundary and at the boundary of particle particles, the dependence on particle velocity and different particles, the study of the peculiarities of the temperature conditions for the formation of adhesion and cohesive bonds in coatings under gas-thermal and gas-dynamic spraying.

The urgency of the study is determined by the fact that the study of the peculiarities of the temperature conditions for the formation of adhesive and cohesive bonds in coatings under gas-thermal and gas-dynamic spraying will solve the problem of creating strong samples with high wear-resistant, corrosion-resistant, antifrictional, heat-resistant, thermobarrier. The results of the study can be used in the development of technologies for the spraying of functional coatings with enhanced adhesion.

In thermal spraying and gas-dynamic spraying to produce coatings with high performance is very important to take into account the energy conditions of the interaction of evaporated particles and the substrate, ie, the activation energy for the process. The temperature in the particle-substrate contact plays an important role in the formation of adhesive bonds between the coating and the substrate, so the knowledge of the numerical values of the temperature is of great practical interest. At present there are various methods of deposition, each of which has certain advantages and disadvantages. To improve the quality of the coatings used in many cases, special methods of activation of spraying.

In a comparative analysis of different methods of thermal spraying. The thermodynamic conditions for the activation energy of the process in the particle-substrate interface. We describe a number of additional activation methods

interaction, evaluated the activation energy for each case and comparative analysis of the methods considered.

Object of research are characteristics of the resulting composite coating conditions by gas-thermal spraying.

In the course of work mathematical calculations by means of computer program EXCEL were carried out. Final qualifying work is executed in text editor microsoft word 2007. In the work to create a graph and a histogram were used Origin 9.0.

Содержание

Реферат.....	1
Annotation.....	3
Введение.....	6
1. Напыление покрытий из порошковых материалов.....	7
1.1 Общая схема процесса напыления.....	7
1.2 Виды газотермических методов напыления (ГТН).....	9
1.3 Метод холодного газодинамического напыления покрытий (ХГН).....	11
1.4 Порошки, применяемые для напыления покрытий.....	14
1.5 Проблема адгезии и когезии покрытий.....	17
2. Особенности процесса формирования напыляемых покрытий.....	21
2.1 Условия независимости поведения напыляемых частиц при формировании газотермических покрытий.....	21
2.2 Температурные условия на границе частица – подложка.....	24
3. Экспериментальная часть.....	27
3.1 Постановка задачи.....	27
3.2 Исследованные материалы.....	28
3.3 Схемы систем покрытие – подложка.....	29
3.4 Температурные условия в контакте при газотермическом напылении.....	31
3.5 Температурные условия в контакте при газодинамическом напылении.....	38
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	46
5. Социальная ответственность.....	64
Заключение.....	85
Список использованных источников.....	86

ВВЕДЕНИЕ

Современные технологии предъявляют высокие требования не только к материалам со специальным набором необходимых свойств, которые отвечают условиям эксплуатации современных машин и механизмов, но также к технологиям, позволяющим производить продукцию из этих материалов. В последнее время технологии получения новых материалов и технологий для получения продуктов из них достигли нового и инновационного пути развития. В то же время спрос на сокращение и потребление металла, что влечет за собой необходимость разработки новых сплавов и методов упрочнения существующих материалов. Затраты на производство для изготовления деталей оказывают решающее влияние на возможность использования существующих и разработанных материалов для изготовления конструкционных деталей. Порошки оказались технологически удобными материалами для решения проблем, связанными с повышением срока службы деталей машин и механизмов. Основным требованием, предъявляемым к порошковым материалам конструкционного назначения, является обеспечение безотказной работы машин, аппаратов, приборов в заданных условиях в течение всего периода эксплуатации.

Широкое применение в машиностроении получила технология газотермического напыления, позволяющая при минимальных затратах материальных и энергетических ресурсов создавать покрытия различного назначения - защитные, упрочняющие, восстановительные. При этом главным условием для любого вида покрытия является обеспечение высокой адгезии. Работа представляет несомненный интерес для многих предприятий машиностроительной, судостроительной, авиастроительной, химической отраслей.

1. Напыление покрытий из порошковых материалов

1.1 Общая схема процесса напыления

Газотермическое напыление покрытий впервые было осуществлено в Швейцарии в начале прошлого века Шоопом М.У., который впервые расплыл расплавленный металл высокоскоростной струей газа и, поставив образец в поток расплынных частиц металла, получил на нем слой покрытия.

К настоящему времени разработано много различных методов газотермического напыления покрытий. В основе всех этих методов лежит нагрев расплываемого материала высокотемпературным источником, образование направленного двухфазного потока, перенос этим потоком частиц порошкового материала и формирование покрытия на рабочей поверхности.

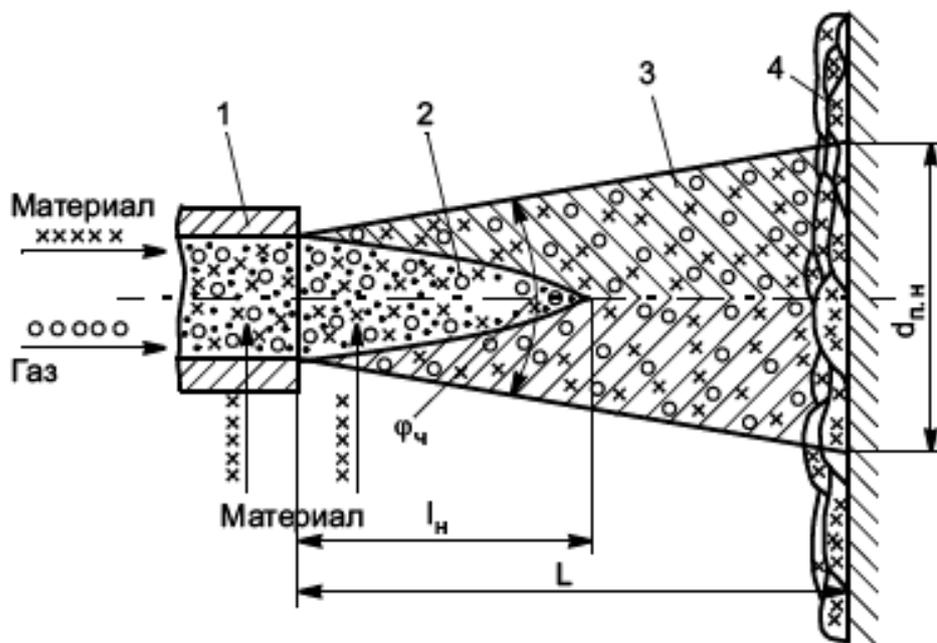


Рисунок 1.1 - Обобщенная схема процесса плазменного напыления покрытий: 1 — сопло-анод; 2 — ядро плазменной струи; 3 — основной участок плазменной струи; 4 — напыляемое покрытие.

На рисунке 1.1 приведена обобщенная схема газотермического порошкового напыления покрытий [1]. Нагрев частиц, их ускорения и скорости для каждого вида газотермического напыления имеют свои особенности. Достигнув поверхности и образуя покрытие, частицы должны гарантировать, что во время контакта, который образуется между нагретой частицей и

основой устанавливается связь. Температура частиц приводит к термической активации в зоне контакта. За счет скорости частицы при встрече с поверхностью основы создают механический контакт и условие активации поверхности. Преобразование кинетической энергии в тепловую обеспечивает высокую температуру в контакте. Разработанные методы газотермического напыления позволяют в достаточных пределах регулировать температуры и скорости частиц, поступающих на поверхность формирования покрытия.

Общим для всех газотермических методов является то, что материал покрытия нагревается, распыляется и ускоряется в высокотемпературном газовом потоке. На поверхность изделия или основы (ранее применяли термин подложка) напыляемый материал поступает в диспергированном состоянии в виде мелких расплавленных или пластифицированных частиц, которые ударяются об нее, деформируются и, закрепляясь, накладываются друг на друга, образуя слоистое покрытие. Деформация частиц приводит к их чрезвычайно быстрой кристаллизации и охлаждению со скоростями, достигающими 10^6 - 10^8 К/с.

Различные методы напыления отличаются источником тепловой энергии, каждый из которых имеет свои характеристики, определяющие особенности нагрева и ускорения напыляемых частиц материала покрытия. Характеристики некоторых методов представлены в таблице 1.1.

Применять газотермические покрытия можно при любых масштабах производства – от индивидуального и малосерийного до высокопроизводительного автоматизированного.

Среди существующих способов газотермического напыления покрытий метод плазменного напыления представляет наибольший интерес как самый универсальный метод в отношении напыляемых материалов. Этим методом с помощью плазменной струи (ее температура 15 000 – 20 000 К) можно напылять любые тугоплавкие материалы [2].

Таблица 1.1 - Характеристики газотермических методов напыления

Наименование параметра	Методы напыления		
	Газопламенный	Плазменный	Детонационный
Источник тепловой энергии	Горючая смесь газов ($O_2+C_2H_2$, O_2+ пропан и др.) при сжигании газовой горелке	Электрическая дуга, плазмообразующий газ (N_2 , Ar и др.) в плазмотроне	Горючая смесь газов ($O_2+C_2H_2$) в детонационной пушке
Температура газовой струи, К	2700 - 3100	15000 - 20000	3000 - 4000
Скорость газовой струи, м/с	400 - 600	500 - 750	2000 - 2500

1.2 Виды газотермических методов напыления

Газотермическое напыление (ГТН) — это процесс нагрева, диспергирования и переноса конденсированных частиц распыляемого материала газовым или плазменным потоком для формирования на подложке слоя нужного материала.

Технология газотермического напыления покрытий (ГТН) позволяет существенно увеличивать срок службы деталей машин и механизмов. Успешное применение данного метода связано с широким выбором материалов, используемых для нанесения покрытий и обеспечивающих высокий уровень качества поверхности [3]. Особенностью технологии (ГТН) является то, что получаемое покрытие формируется из направленного потока дисперсных частиц. Структура материала покрытия формируется при ударе, деформации и затвердевании нагретых (или расплавленных) частиц на поверхности основы или предыдущих остывших частиц. При этом образуется слоистый материал, состоящий из деформированных частиц (слэтов), соединенных контактными участками. Определяющим условием образования прочного соединения частиц друг с другом и с напыляемой поверхностью (высокой адгезии и когезии) являются высокая скорость частиц и высокая температура на контактной границе частица-подложка [4].

Методы газотермического напыления классифицируют:

- по видам энергии;
- по видам источника теплоты;
- по видам распыляемого материала;
- по видам защиты;
- по степени механизации и автоматизации;
- по периодичности потока частиц.

По виду энергии различают методы с использованием электрической энергии (газоэлектрические методы) и методы, в которых тепловая энергия образуется за счет сгорания горючих газов (газопламенные методы).

Для нагрева распыляемого материала используют следующие **виды источника теплоты**: дугу, плазму, высокочастотные разряды и газовое пламя. Соответственно этому методы напыления называют: электродуговая металлизация, плазменное напыление, высокочастотная металлизация, газопламенное напыление, детонационно-газовое напыление. Первые три метода относятся к газоэлектрическим, последние – к газопламенным.

По виду распыляемого материала применяют порошковые, проволочные (стержневые) и комбинированные способы напыления. При комбинированных способах используется порошковая проволока.

Известны следующие методы **напыления по виду защиты**: без защиты процесса, с местной защитой и с общей защитой в герметичных камерах. При общей защите различают ведение процесса при нормальном (атмосферном) давлении, повышенном и при разрежении (в низком вакууме).

Степень механизации и автоматизации процесса. При ручных способах напыления механизирована только подача распыляемого материала. В механизированных способах предусмотрено также перемещение распылителя относительно напыляемого изделия. Часто используют движение напыляемых изделий относительно неподвижного распылителя. Уровень автоматизации процессов напыления зависит от конструкции установки, в простейших

вариантах автоматизация отсутствует, а в сложных комплексах возможна полная автоматизация процесса.

Периодичность потока. Большинство методов напыления осуществляется непрерывным потоком частиц. Для некоторых методов возможно только циклическое ведение процесса. Покрытие формируется в импульсном режиме напыления, чередуемого с паузами. Газотермические методы напыления широко используются для нанесения покрытий различного назначения. К основным достоинствам методов газотермического напыления относят высокую производительность процесса при удовлетворительном качестве покрытий.

Частицы напыляемого материала размером 5 – 200 мкм, при большинстве способов напыления находясь в расплавленном состоянии, с высокой скоростью 50 – 1000 м/сек ударяются о напыляемую поверхность (подложку) практически холодную. Происходит расплющивание этих частиц и иногда частичное разбрызгивание. При этом они резко охлаждаются со всеми возможными последствиями для формирования кристаллической или аморфной структуры расплющенной частицы. Эти расплющенные частицы (чешуйки) наслаиваются друг на друга, образуя чешуйчатую структуру покрытия. Чешуйки отделены друг от друга окисной плёнкой, которая в ряде случаев образует керамический каркас покрытия. Именно эти особенности формирования и строения газотермических покрытий и определяют их уникальные свойства.

1.3 Метод холодного газодинамического напыления покрытий (ХГН)

При холодном газодинамическом напылении (ХГН) покрытие из металлических частиц, ускоренных в сверхзвуковом потоке газа до скорости несколько сот метров в секунду, когда они сталкиваются с напыляемой поверхностью. Когда нерасплавленные металлические частицы ударяются о подложку, происходит их пластическая деформация, и кинетическая энергия частиц преобразуется в тепловую энергию, и частично, в энергию связи с

подложкой, формируя непрерывный слой из плотно упакованных частиц металла [5].

Основной особенностью ХГН является отсутствие высоких температур в процессе формирования металлических покрытий, следовательно, отсутствие окисления материалов частиц и основы, процессов неравновесной кристаллизации, высоких внутренних напряжений в обрабатываемых деталях.

Сущность метода холодного газодинамического распыления включает: формирование в сопле сверхзвукового потока газа, подачу в этот поток напыляемого материала в виде частиц с размерами в диапазоне от 0,01 до 50 мкм, ускорение частиц порошка и направление на поверхность изделия, которая может быть с охлаждением или подогревом. В качестве газа используют воздух, гелий, азот. Значения температуры значительно меньше температуры плавления материала $(0,4 - 0,7)T_{пл}$. Покрытие данным методом может быть нанесено не только на металл, но и на стекло, керамику, камень, бетон. Покрытия обладают высокой механической прочностью и имеют высокую адгезию к подложке.

Впервые явление формирования покрытий путем холодного газодинамического распыления было исследовано в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук в начале 1980-х годов. Они выяснили, что для того, чтобы образовалось покрытие необязательно, чтобы частицы были в расплавленном состоянии или пред расплавленном состоянии. Возможно его получение из частиц при температуре, по существу, ниже его точки плавления, в отличие от традиционных методов напыления [6].

В настоящее время существуют два основных типа ХГН:

- Холодное газодинамическое напыление высокого давления. Рабочий газ при давлении выше, чем 1,5 МПа (азот) или 1,515 МПа (газообразный гелий), скорость расхода $2 \text{ м}^3/\text{мин}$, тепловая мощность расхода 18 кВт. Для распыления обычно используют чистый металлический порошок.

- Холодное газодинамическое напыление низкого давления. Давление сжатого воздуха из рабочего газа используется от 0,5 до 1,0 МПа (5-10 атм.), скорость расхода 0,5 м³/мин, мощность расхода 3 - 5 кВт. Используется механическая смесь металлических и керамических порошков для нанесения покрытия распылением. Для получения качественных покрытий при относительно низких затратах энергии применяют керамический компонент, включенный в смеси для повышения механической активации поверхности.



Рисунок 1.2 - Схема классической установки ХГН включает в себя газовый нагреватель, герметичный порошковый питатель и смесительную камеру сопло Лаваля.

Отметим основные наиболее общие требования для процесса осаждения нерасплавленных металлических частиц при ХГН [7]. Для осаждения частиц металла методом распыления необходимо:

- температура газовой струи должна обеспечить нагрев напыляемого порошка до температур ниже, чем температура плавления материала частиц или состояния размягчения материала;
- размер частиц должен быть в пределах от 1 до 50 мкм;
- скорость частиц должна варьироваться в зависимости от размера частиц и вида материала от 300 до 1200 м/с;

При методе холодного распыления используют обычный распылитель низкого давления, а также различные металлические порошки из других керамических частиц (оксид алюминия Al_2O_3 , карбиды кремния SiC). Считается, что эти добавки активируются на поверхности подложки, тем самым улучшая адгезию, и очищают сопло.

1.4 Порошки, применяемые для напыления покрытий

Порошковые материалы классифицируют по назначению (жаропрочные, коррозионностойкие, магнитные, антифрикционные, контактные, фрикционные и др.), по плотности (плотные, пористые), по химическому составу (чистые металлические порошки; порошок сплава; керамические порошки; композитные порошки) по технологии получения (спечённые, компостированные) [8].

Чистые металлические порошки— напыление чистого металла используют, как правило, для придания присущих этим металлам свойств, или обеспечение хорошей адгезии к поверхности основного металла характеристик промежуточного слоя. Механические свойства изделий из чистых металлических порошков близки к свойствам литых деталей. В некоторых случаях это может быть выбрано прессование и спекание, предусматривающих повышенную прочность продукта.

Есть много типов чистых металлических порошков, например, медный порошок(Cu); титановый порошок(Ni); вольфрамовый порошок(W); порошок молибденовый(Mo); железный порошок(Fe); титановый порошок(Ti) и т.е. У них есть высокая коррозионная стойкость, стойкость к истиранию. Они могут работать при высоких температурах.

Преимущества чистых металлических порошков:

- высокая химическая чистота порошка по металлическим примесям и вредным примесям внедрения, обеспечивающая лучшие характеристики проката и изделий, изготавливаемых из него;

- высокая уплотняемость порошка, достаточная для получения прочных мелких и крупногабаритных полуфабрикатов при прессовании в жестких матрицах или методом холодного изостатического прессования без пластификатора;

- возможность выбора порошка с различными размерами частиц и с определенной морфологией кристаллитов

Порошок из сплава имеет высокую плотность и может содержать бор, кобальт, вольфрам. Порошок характеризуется очень высокой износостойкостью и плохой обрабатываемостью и используется в продуктах с высокой износостойкостью при высокотемпературных условиях работы и в активных средах.

Например, сплав нихрома марки X20H80, характеризуется следующим составом: Ni (73-78 %); Cr (19-21 %); Si (1 %); Mn (0,7 %); остальное Fe. Нихром X20H80, в частности, проволока являются самым ликвидным сортаментом нихрома. Материалы используются для напыления и наплавки покрытий, они стойкие против коррозии, к изнашиванию трением и абразивными частицами. Покрытия устойчивы к газовой коррозии вплоть до температур 700–850 °С, стойки к пресной и морской воде, солевым растворам, нефтесодержащим средам, аммиаку и другим агрессивным средам. Нестойки или слабостойки к растворам минеральных кислот. Сплавы плавятся в диапазоне температур, характерном для материалов с эвтектикой в структуре. Твердость и износостойкость покрытий увеличиваются по мере увеличения в никелевых сплавах содержания хрома, бора, кремния и углерода. Адгезия, когезия и сопротивление изнашиванию покрытий из сплавов одинакового состава при сухом трении и абразивном воздействии, как правило, повышается с увеличением плотности (снижении пористости) покрытия [9].

Нанесение покрытия распылением порошка и использование проволоки. С помощью термического напыления (высокие дуговой сварки) предотвращается износ проволоки и она изготавливается с высокой точностью. При восстановлении стальных и чугунных деталей напылением наиболее часто применяется стальная проволока диаметром 0,8—3,0 мм с содержанием углерода 0,3—0,8 % в зависимости от материала восстанавливаемой детали и требований к нанесенному металлу. Когда поверхность фиксации проволоки незащищенная, линия восстановления может быть использована с содержанием углерода 0,3%, и поверхностями рабочих условий при трении, необходимо

использовать проволоку с высоким содержанием углерода и легирующим элементом.

Для противокоррозионных покрытий используют цинковую, алюминиевую и стальную проволоку (из стали 10X18H10T). Проволоки из алюминиевой бронзы применяют для получения антифрикционных покрытий подшипников скольжения.

Керамические порошки из оксида и карбида металла, сплавов и смесей механического карбида. Оксид имеет низкую тепло- и электропроводность и высокую термостойкость. Порошок для распыления комплексного соединения, который часто используется, представляет собой соединение (FeV) двух или более оксидов металлов (ZrO_2 , Al_2O_3) или их смеси (ПХНШ). Температура плавления композитного оксида, как правило, выше, чем температура плавления простого покрытия, это влияет на низкое тепловое сопротивление. При работе в высокотемпературной атмосфере восстановительного характера оксиды ряда металлов (церия, хрома, никеля, титана и др.) Преобразование при нагревании может протекать при определенных обстоятельствах, сопровождаться значительным изменением объема, что приводит к отделению от подложки или трещин. Карбиды тугоплавких металлов имеют температуру размягчения выше $300^\circ C$ и обладают большей жаростойкостью и стойкостью против окисления. Эти характеристики, а также высокая твердость, хорошая теплопроводность, обеспечивают высокую износостойкость режущего инструмента.

Композитный материал - получается из комбинации компонентов синтетического материала, имеющего различные свойства. Компонент представляет собой матрицу (основание), а также армирующие добавки (волокна, частицы). Используется полимерная матрица, металлы, керамика, и углеродные материалы. Отвердителями служат волокна - стекло, бор, углерод, органические усы (карбиды, нитриды, берилл и т.д.) и металлический провод, имеющий высокую прочность и жесткость. Свойства композита зависят от компонентов и количественного соотношения состава и прочности скрепления

между ними. Связывание объемного содержания компонентов возможно, в зависимости от цели, а также для получения требуемой прочности, теплостойкости, модуля упругости материала, или для получения конкретных желаемых свойств.

1.5 Проблема адгезии и когезии покрытия

Существующие в литературе многочисленные определения **адгезии** по семантическим признакам могут быть отнесены к формулировкам, определяющие **адгезию** как процесс (последовательную смену состояний).

Адгезия (прилипание) - возникновение связи между поверхностными слоями двух разнородных (твердых или жидких) тел (фаз), приведенных в соприкосновение.

Примеры такого подхода можно множить. Видно, что здесь адгезия трактуется как *процесс* в системе из двух конденсированных фаз при их сближении (из бесконечного удаления) до расстояния действия межмолекулярных сил, в результате которого возникает связь между разнородными конденсированными фазами [9].

Не менее важной характеристикой сцепления атомов (ионов, молекул) физического тела под воздействием сил притяжения является когезия. Данные силы взаимодействия определяют совокупность физико-химических и физических свойств вещества, в первую очередь механические свойства. Критерием прочности этого соединения является усилие, при котором происходит отделение напыляемого материала по границе с основным металлом при растяжении, отнесенное к площади поверхности контрообразца.

Адгезионная прочность является одной из важнейших характеристик качества напыляемых покрытий, определяющей работоспособность и срок службы обрабатываемого изделия. Адгезия определяет прочность связи между покрытием и подложкой. Величина адгезии в первую очередь зависит от температуры на контактной границе и времени активного взаимодействия напыленной частицы и напыляемой поверхности. Эти условия определяют

интенсивность образования адгезионной связи на границе подложка - напыленная частица. В общем случае величина адгезии и когезии (когезия – характеристика связи между напыляемой частицей и уже напыленной частицей, которая в данном случае играет роль подложки) определяется условиями на уровне контактного взаимодействия частица – подложка, частица – частица и зависит от многих параметров: температура частицы, температура подложки, размер и скорость частицы, время высокотемпературного контакта, давление в контакте и др.

Для описания формирования адгезионной связи между напыляемой частицей и подложкой удобно рассматривать процесс взаимодействия частица-подложка на микроуровне. В этом случае величина адгезии рассматривается, как отношение общего количества атомов в пятне напыления (на контактной границе) к количеству атомов, образовавших взаимную связь между частицей и подложкой.

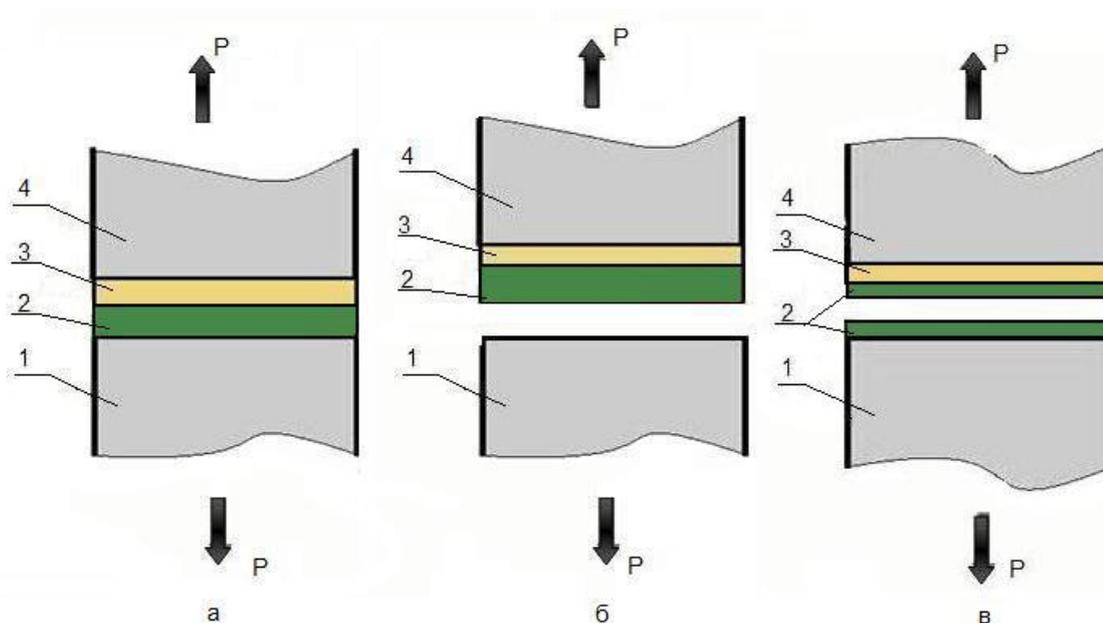


Рисунок 1.5 – Определение прочности соединения покрытия с основным металлом: а) подготовка образца, б) определение адгезии, в) определение когезии, 1 – основной металл (образец), 2 – напыляемый металл, 3 – клей, 4 – контрообразец

Известно, что если не обеспечить требуемый уровень сцепления покрытия с поверхностью детали т.е. адгезии и когезии, то такое покрытие не найдет

практического применения. Как на рисунке 1.5 показано, а) внешнее напряжение прикладывается к подготовленному образцу; б) если адгезионная прочность меньше когезионной прочности, образца будет происходить разрушение на границе покрытия-подложки. Срока службы детали уменьшается. в) если адгезионная прочность больше когезионной прочности образца будет происходить разрушение на границе покрытия-покрытия. Покрытие на поверхности образца не исчезает, поэтому для образца возможна нормальная эксплуатация.

Большое влияние на адгезию покрытия оказывает температура подложки. При нагреве подложки для некоторых материалов она увеличивается в несколько раз на каждые 100 градусов. Максимальная адгезионная прочность для большинства материалов достигается уже при нагреве на 100-200 градусов.

Существует два основных пути повышения адгезии: с помощью подготовки поверхности или с помощью выбора оптимальных параметров технологии напыления. Так например, для лучшего сцепления металла с подложкой необходимо обеспечить достаточную шероховатость поверхности это достигается нижеуказанными способами.

Технология напыления оказывает большое влияние на результат адгезии, так в случае напыления проволоки при слишком большой скорости подачи напыляемого материала увеличивается длина участка проволоки, на котором происходит расплавление, что может привести к значительному ее окислению в процессе распыления. Это усугубляется увеличением размера частиц до значений, ухудшающих качество напыляемого покрытия. Для создания оптимальных условий взаимодействия материала покрытия с материалом подложки и получения высокой адгезии используются различные методы предварительной обработки поверхности. Эти методы можно условно разделить на отдельные группы, которые представлены в таблице 1.2.

Таблице 1.2 – Способы подготовки поверхности

МЕТОД	СПОСОБ	ЦЕЛЬ
Механические методы	Шлифование, галтовка, полирование, струйно-абразивная обработка, нарезка "рваной" резьбы	Очистка от грубых загрязнений, окалины, оксидных пленок, активация поверхности, изменение шероховатости
Химические методы	Обезжиривание, травление, полирование, ультразвуковая очистка	Удаление жиров, уменьшение шероховатости
Физические методы	Ионная, электронная бомбардировка, вакуумный отжиг	Удаление загрязнений за счет распыления их с поверхности, активация поверхности
Нанесение временных защитных покрытий	Покрытие пленкой, лаком, сульфидирование, хроматирование	Временная защита подготовленной поверхности
Нанесение промежуточных покрытий	Любые способы	Повышение адгезии при плохой совместимости материалов

2. Особенности процесса формирования напыляемых покрытий

2.1 Условие независимости поведения напыляемых частиц при формировании газотермических покрытий

Все более широкое применение газотермических покрытий различного функционального назначения (износостойких, коррозионностойких, теплозащитных, электрозащитных и пр.), проблемы создания новых и совершенствования существующих технологий ГТН, а также другие факторы порождают необходимость в углубленном изучении тепловых явлений, наблюдаемых при реализации данного класса технологических процессов. Это обусловлено тем обстоятельством, что тепловые явления играют, как известно, ведущую роль в формировании получаемых покрытий.

При изучении теплофизических аспектов технологии ГТН особо выделяются два направления исследований. Первое из них касается рассмотрения процессов теплопереноса в двухфазных потоках (напыляемые частицы—нагретый газ) на стадии нагрева и плавления частиц [10], второе— изучения тепловых процессов на собственной основе [11].

В [12] приведена характеристика важнейших особенностей трёх основных подходов к анализу рассматриваемых тепловых явлений. Первый из них связан с изучением процессов термического взаимодействия одиночной частицы с основой, второй с исследованием температурных режимов систем покрытие в целом основа. И, наконец, третий подход характеризуется стремлением учесть, как локальные, так и интегральные эффекты взаимодействия частиц с основой.

Для изучения тепловых явлений при взаимодействии одиночных частиц с твёрдой поверхностью необходимо отметить следующее. Согласно современным представлениям, процесс образования соединения между напыляемыми частицами и основой рассматривается на базе теории физико-химического взаимодействия как твердофазной топохимической реакции [13]. В соответствии с выводами данной теории развитие указанных процессов физико-химического взаимодействия существенно зависит от температуры в зоне контакта частица—основа. Это обстоятельство и обуславливает большой

интерес к вопросам математического моделирования процессов теплопереноса с использованием первого подхода, когда учитывается взаимодействие одиночных частиц с основой.

Обзор теоретических моделей взаимодействия частицы с подложкой при ГТН удобно рассматривать, если исследовать разные масштабные уровни, определяющие различные элементы объёма формируемого напыленного покрытия. Так, если первый подход при анализе тепловых явлений при взаимодействии одиночных частиц с поверхностью напыления рассматривать как процесс, протекающий на мезомасштабном уровне, то два других подхода можно связать с макромасштабным уровнем (образование и рост по толщине всего покрытия или пятна напыления) и с микромасштабным уровнем (взаимодействие отдельных атомов материалов частицы и подложки на границы раздела частица-подложка).

Каждый из масштабных уровней позволяет решать определенные задачи, связанные с формированием ГТН покрытий:

- Макроуровень: температурные, остаточные напряжения;
- Мезоуровень: пористость;
- Микроуровень: адгезия.

В зависимости от назначений и условий работы покрытия, его испытывают на плотность, износостойкость, прочность сцепления, химическую стойкость, жаростойкость, твердость и получают сведения об эксплуатационных возможностях данного покрытия. Такие испытания и исследования имеют большую практическую ценность, но в силу своей интегральности не позволяют изучать элементарные физико-химические явления, ведущие к образованию покрытия и в конечном счете, определяющие его технические характеристики. В частности, они не позволяют исследовать контактное взаимодействие частиц напыляемого материала и выяснять причины и закономерности их прочного соединения с поверхностью изделия и образования самого слоя покрытия. Поэтому для решения задач теории формирования покрытий были разработаны специальные методы исследования.

Они основаны на анализе пространственно-временной структуры процессов образования покрытия и на изучении механизма и кинетики физико-химического взаимодействия в контакте частиц различных материалов.

В таблице 2.1 представлена элементная база масштабных уровней, описывающий процесс формирования ГТН покрытий.

Таблица 2.1 – Элементная база масштабных уровней

Уровень масштабный	Элементы уровня	Параметры процесса
Макроуровень	Покрытие, определенной толщины; пятно напыления	Производительность по порошку; толщина покрытия; скорость роста толщины покрытия; температура покрытия
Мезоуровень	Отдельная частица; поток отдельных частиц; подложка	Скорость частицы; диаметр частицы; температура частицы; диаметр сплэта; высота сплэта; температура подложки; температуро контакта
Микроуровень	Атомы материала частицы; атомы материала подложки; дислокации; дефекты структуры	Энергия активации атома; энергия связи атома; адгезия

Поскольку покрытие представляет собой слоистый материал, который формируется из потока расплавленных частиц, естественно возникает вопрос об их взаимном тепловом влиянии в период образования покрытия. Очевидно, имеется два возможных варианта взаимодействия частиц между собой в пятне напыления: 1) расплавленная частица накладывается на предыдущую частицу, которая еще не полностью закристаллизовалась; 2) расплавленная частица ложится на частицу уже затвердевшую, но еще не остывшую полностью, т.е. имеющую температуру более высокую, чем температура основы. Будем называть такую частицу термически активной частицей.

Простейший расчет показывает, что для того чтобы напыляемые частицы могли ложиться на еще не полностью закристаллизовавшиеся частицы предыдущего слоя покрытия, необходим рост толщины покрытия со скоростью, равной или превышающей h/τ_0 , где h – высота затвердевшей за время τ_0 частицы. Для этого при самых благоприятных условиях потребуется производительность на два-три порядка превышающая реальную, обычно не превышающую 5-20 кг/ч. Из этого можно сделать вывод, что формирование покрытий можем рассматривать как напыление отдельных частиц. Таким образом, можно считать, что напыление, которое рассматривает формирование покрытий из отдельных частиц, может описывать реальную картину напыления покрытий.

2.2 Температурные условия на границе частица – подложка

Важной характеристикой изменения контактной температуры на границе напыленная частица – напыляемая поверхность является термический цикл в контакте. Для теоретического описания термического цикла в контакте рассмотрим тепловую модель процесса взаимодействия сферической частицы с подложкой при ее ударе, растекании и тепловом контакте с подложкой. Одновременно с растеканием частица начинает затвердевать таким образом, что фронт кристаллизации движется от подложки. Как только вся жидкость затвердеет, движение фронта прекращается. Скорость движения фронта кристаллизации и высота закристаллизовавшейся частицы определяют длительность затвердевания t_k (Рис. 2.1).

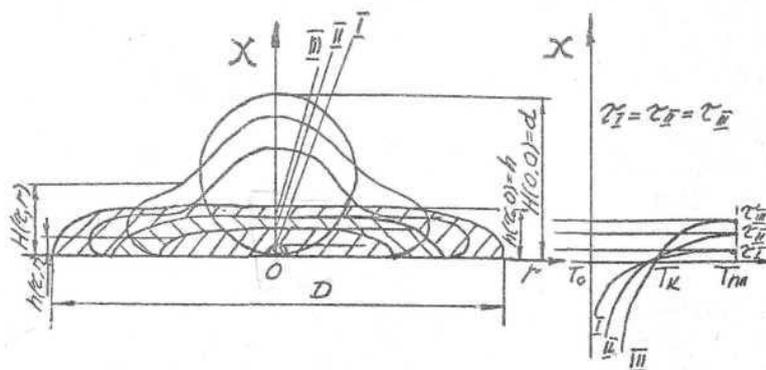


Рисунок 2.1 - Распределение температуры в различные моменты времени τ в системе: твердая подложка с T_0 и жидкая частица при температуре плавления T_m , быстро деформирующая и одновременно затвердевающая.

После затвердевания частицы, дальнейшее охлаждение происходит уже в твердом состоянии. Расчеты показывают, что время полного охлаждения по порядку величины составляет $\sim 100 t_k$.

Интересной и очень важной особенностью затвердевания частиц, находящихся при температуре плавления, является постоянство температура контакта T_k на протяжении всего периода затвердевания. После затвердевания частицы дальнейшее охлаждение происходит в твердой фазе. Эту особенность необходимо учитывать при анализе физико-химических процессов взаимодействия материалов покрытия и подложки при напылении [14].

На рис.2.2 представлен термический цикл в контакте частица-подложка и его основные элементы. Термический цикл $T_k(t)$ сферической частицы, деформирующейся вследствие кинетической энергии удара и затвердевающей на подложке, можно представить состоящим из двух этапов: 1) затвердевание частицы в течение времени t_0 , когда $T = \text{const}$, а над подвижным фронтом кристаллизации находится жидкость; 2) охлаждение затвердевшей частицы до температуры подложки T_0 . Длительность кристаллизации металлов t_0 оценивается микросекундами. В подложке под частицей происходит интенсивный нагрев, что приводит к появлению высокого градиента и больших скоростей нагрева - охлаждения.

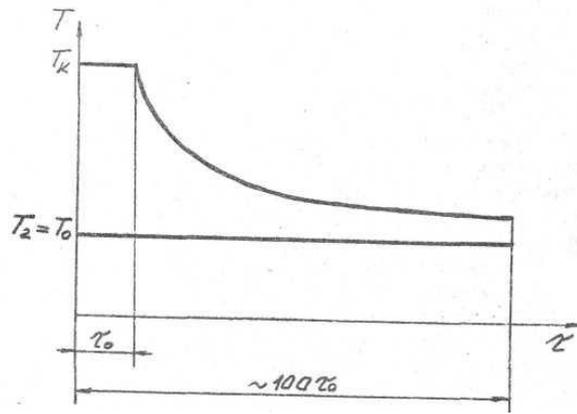


Рисунок 2.2 - Схема термического цикла в контакте

3. Экспериментальная часть

Как показано в литературном обзоре процесс формирования напыленных покрытий можно рассматривать как последовательную укладку напыляемых частиц на поверхности подложки, при этом, с учетом независимости поведения частиц, состоящим из отдельных элементарных актов «взаимодействие частица-подложка». Каждому из таких элементарных актов отвечает определенная температура в контакте на границе частица-подложка. Значение этой температуры является определяющим фактором при формировании прочностной связи между частицей и подложкой, и, следовательно, величины адгезии всего покрытия.

Цель работы – провести количественную оценку контактной температуры на границе частица - подложка и на границе частица - подложка из напыленных ранее частиц. Исследовать влияние скорости частиц, теплофизических характеристик материала частиц на особенности температурных условий формирования адгезионных и когезионных связей в покрытиях при газотермическом и газодинамическом напылении.

3.1 Постановка задачи

В работе поставлена задача:

1. Разработать методику расчета контактной температуры на границе частица - подложка с учетом скорости для газотермического и холодного газодинамического напыления покрытий.

2. Провести расчет контактной температуры при взаимодействии напыленной частицы с подложкой в широкой области скоростей напыления для металлических, керамических порошков и порошков из сплава.

3. Провести сравнительный анализ условий формирования адгезии (температура в контакте частицы с подложкой (основной материал)) и когезии (температура в контакте частицы с подложкой из слоя напыленных ранее частиц) при газотермическом (ГТН) и холодном газодинамическом (ХГН) напылении.

3.2 Исследованные материалы

Из многообразия порошков, применяемых для напыления покрытий, в работе выбраны порошки трех типов, обладающие отличающимися физическими свойствами: из чистых металлов – Ni, Ti, Mo, Fe, Cu, W; порошки сплавов – X20H80, ПГ-А15, П2Х15; керамические порошки – Al₂O₃, ZrO₂, FeB. В качестве материала основы (подложка), на которую наносится покрытие, рассматривается, широко используемая в машиностроении, малоуглеродистая сталь СТ20.

В таблице 3.1 представлены теплофизические свойства материалов подложки (s) и частицы (p): (удельная плотность материала – ρ , удельная теплоёмкости – c , коэффициент теплопроводности – λ , температура плавления – T_m .) Индексы (s) и (p) соответствуют значению свойств материалов при комнатной (s) и высокой (p) температуре.

Таблица 3.1 - Теплофизические свойства материалов

Материалы порошки		ρ , кг/м ³	c , Дж/кг*К	λ , Вт/м*К	T_m , К
Чистые металлы	Ni(s)	8900	443.6	90.4	-
	Ni(p)	8100	625	78.5	1728
	Ti(s)	4500	530.8	22.3	-
	Ti(p)	4260	854.1	33	1944
	Mo(s)	10210	249.9	139.8	-
	Mo(p)	9100	420	89.7	2896
	Fe(s)	7870	447	80	-
	Fe(p)	7040	805	35	1811
	Cu(s)	8933	385	393	-
	Cu(p)	8361	525	317	1357
	W(s)	19260	132	162.8	-
W(p)	17500	270.7	99	3695	
Керамики	Al ₂ O ₃ (s)	3970	784	30.3	-
	Al ₂ O ₃ (p)	3290	1666	7.58	2288
	ZrO ₂ (s)	5560	513	25	-
	ZrO ₂ (p)	5070	600	19	2950
	FeB(s)	6930	503	33	-
	FeB(p)	6320	720	17	1500
Сплава	X20H80(s)	7900	450	80	-
	X20H80(p)	7020	600	50	1673
	ПГ-А15(s)	8642	445	91	-
	ПГ-А15(p)	7903	670	74	1783
	П2Х13(s)	7766	448	82	-
	П2Х13(p)	6990	835	38	1923
Материалы подложка		ρ , кг/м ³	c , Дж/кг*К	λ , Вт/м*К	T_m , К
Основа	Ст20(s)	7850	690	50.7	-

3.3 Схемы систем покрытие – подложка

Для анализа температурных условий на границе напыленной частицы с подложкой рассмотрим условия контакта, определяющие адгезию напыляемого покрытия и условия контакта, определяющие когезию внутри напыленного слоя. Например, для исследованной системы Ni/Ст20 температура в контакте на границе частица (Ni) – подложка (Ст20) создаются условия для образования адгезионного взаимодействия между контактирующими поверхностями, на границе частица (Ni) – подложка (Ni) создаются условия для образования когезионного взаимодействия. Схемы взаимодействующих слоев при образовании покрытий, для которых проводился расчет, показаны на рис.3.1.

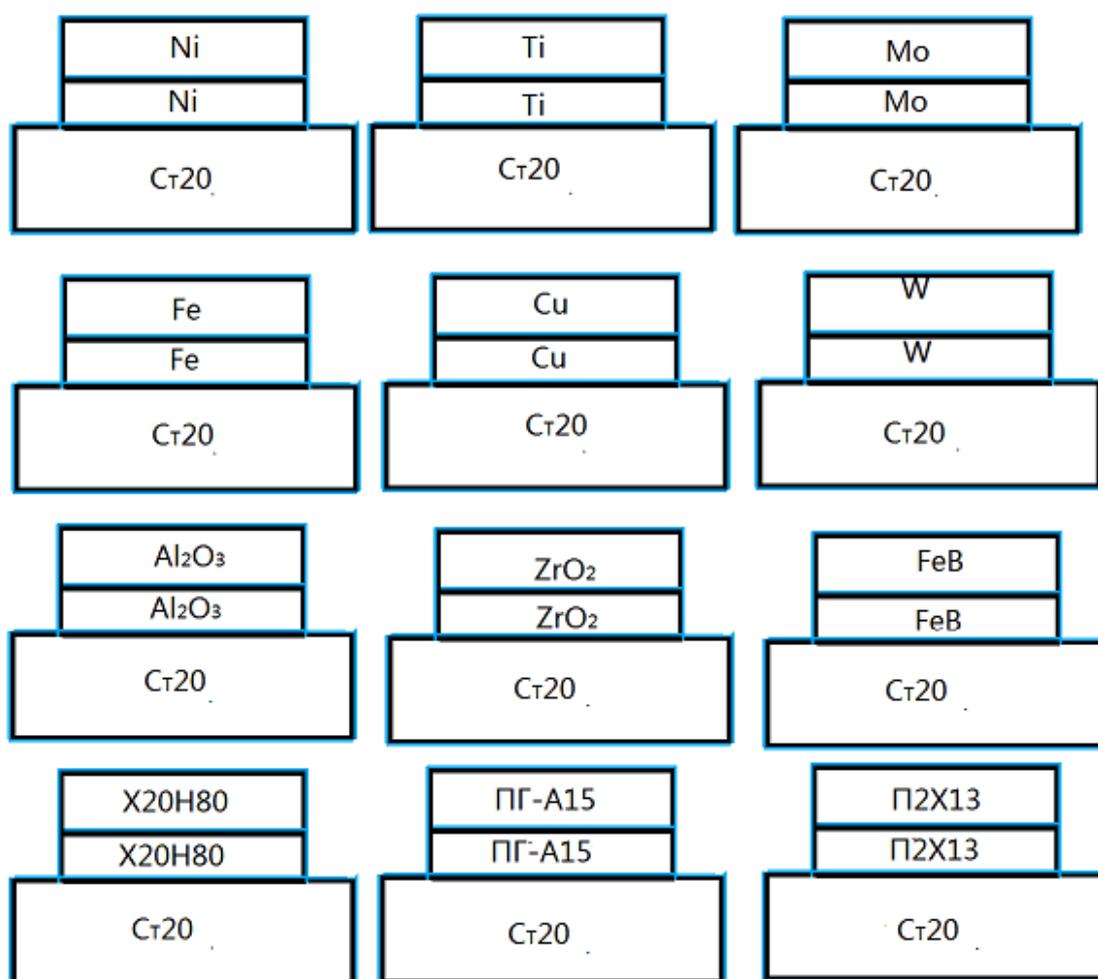


Рисунок. 3.1 - Схемы покрытий для исследованных систем Ni/Ст20, Ti/Ст20, Mo/Ст20, Fe/Ст20, Cu/Ст20, W/Ст20, Al₂O₃/Ст20, ZrO₂/Ст20, FeB/Ст20, X20H80/Ст20, ПГ-А13/Ст20, П2Х13/Ст20

Температуру в контакте "частица - подложка" можно определить, как [15]

$$T_c(\xi, \tau) = T_c^0(\xi, \tau) + \Delta T_v(\xi, \tau), \quad (1)$$

где T_c^0 - температура в контакте двух различно нагретых тел без учета скорости; ΔT_v - температура дополнительного подогрева контакта за счет тепла, выделяемого при ударе.

В первом приближении температуру контакта двух полубесконечных тел можно оценить по формуле (2) и (3):

$$T_c^0(\xi, \tau) = T_c^0 = \frac{T_s + K_p T_p}{1 + K_p}, \quad (2)$$

где K_p – критерий тепловой активности частицы по отношению к подложке; T_s , T_p – температуры подложки и частицы перед ударом.

$$K_p = \sqrt{\frac{\lambda_p c_p \rho_p}{\lambda_s c_s \rho_s}}, \quad (3)$$

где ρ_s , ρ_p , λ_s , λ_p , c_s , c_p – плотность, коэффициент теплопроводности и коэффициент теплоемкости подложки (s) и частицы (p) соответственно.

Для точного определения температура в контакте необходимо проводить расчет с учетом скорости напыляемой частицы (кинетическая энергия). Согласно уравнению (1), для этого необходимо знать температуру дополнительного подогрева контакта за счет тепла, выделяемого при ударе [16].

Для расчёта температуры дополнительного подогрева рассмотрим баланс энергии, принимая, что вся кинетическая энергия частицы переходит в тепловую энергию.

$$E_{\text{кин}} = Q,$$

где $E_{\text{кин}}$ – кинетическая энергия, Q – тепловая энергия.

$$E_{\text{кин}} = \frac{mv^2}{2},$$

где m – масса частицы, v – скорость частицы перед столкновением.

$$Q = mc\Delta T,$$

где c – теплоёмкость материала частицы.

$$\frac{mv^2}{2} = mc\Delta T, \quad \Delta T = \frac{v^2}{2c},$$

Контактную температуру для произвольной скорости частицы можно определить по формуле

$$T_c = \frac{T_s + K_p(T_p + \Delta T)}{1 + K_p}, \quad (4)$$

где $(T_p + \Delta T)$ – температура частицы в момент соударения; T_p – температура частицы, которую она приобрела в полете до столкновения с подложкой; ΔT – дополнительный подогрев частицы за счёт кинетической энергии.

Глава 4. Финансовая работа

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

Данный дипломный проект относится к научно-исследовательским работам (НИР), которые выполняются с целью расширения, углубления, систематизации знаний по определенной научной проблеме и анализ потребителей результатов исследования, т.е. теоретического и экспериментального характера.

Тема моей дипломной работа «Особенности температурных условий формирования адгезионных и когезионных связей в покрытиях при газотермическом и газодинамическом напылении». Данная работа посвящена нахождению численного значения важной характеристики газотермического и газодинамического покрытия.

Актуальность исследования определяется тем, что изучение особенностей температурных условий формирования адгезионных и когезионных связей в покрытиях при газотермическом и газодинамическом напылении позволит решить проблему создания прочных материалов с высокой антикоррозионной стойкостью. Работа представляет несомненный интерес для многих предприятий машиностроительной, судостроительной, авиастроительной, химической отраслей. Предприятиям важно продлевать срок службы деталей машин и их узлов [14].

Исследуя рынок потенциальных потребителей, можно выделить ряд предприятий, которым потенциально интересны результаты исследований. В связи с этим напыление покрытий газотермическим методом является конкурентоспособным по нескольким параметрам: цена, срок службы и другим. Информация о компании и каталоге продукции в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Информация о компании и продукции.

Информация о компании	Продукции
ОАО «Металл-Коаплект Денпр» г.Каменск-Уральский	<u>Фланцы на номинальное давление до PN 250 ГОСТ 33259-2015Ж; HAWLE задвижки и затворы (149) и др.</u>
Открытое акционерное общество «Воронежское акционерное самолетостроительное Общество», г. Воронеж.	Sukhoi Superjet 100 – это региональный самолет нового поколения, который объединяет в себе новейшие технологии в области авиастроения.
ОАО «Вертолеты России», г. Москва.	ЗИЛ-5301 «Бычок» — российский малотоннажный грузовой автомобиль производства Завода имени Лихачева. Серийно выпускается с 1996 года.

4.2 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований

В предыдущем разделе были описаны методы, которые позволяют выявить и предложить возможные альтернативы проведения исследования и доработки результатов. Но сейчас мы используем морфологический подход, так как возникают сложности применения вышеописанных методов на предпроектной стадии проведения научных исследований. Мы выбрали разные методы технологии приведены в таблице 2.

Таблица 4.2 - Разные методы технология

	1	2	3	4	5
А. Сырьё	Частицы холодные	Частицы холодные	Частицы горячие	Частицы горячие	Частицы горячие
Б. скорость частицы	0	100-1000	0	100-1000	100-1000
Г. Комнатная температура	300	300	300	300	300
Д. тип частицы	Чистый металл	Керамический порошок	Порошок сплава	Чистый металл	Чистый металл
Е. название частицы	Ti	Al ₂ O ₃	X20H80	Cu	Mo
Ж. Температура в контакте	Низкая	Средняя	Чуть ниже	Выше средней	Самая высокая
З.Адгезия в контакте	Низкая	Средняя	Чуть ниже	Выше средней	Самая высокая

В таблице 4.2 показан что, выбор наиболее желательных функционально конкретных решений. На этом этапе описываются возможные варианты решения поставленной проблемы с позиции ее функционального содержания и ресурсосбережения [15].

SWOT-анализ — метод стратегического планирования, заключающийся в выявлении факторов внутренней и внешней среды организации и разделении их на четыре категории: сильные стороны, слабые стороны, возможности, угрозы.

Таблица 4.3 – Матрица SWOT

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта	Слабые стороны научно-исследовательского проекта
	<p>С1. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями.</p> <p>С2. Квалифицированный персонал.</p> <p>С3. Новый научный подход</p> <p>С4. Имеется лаборатория физического материаловедения оборудованная современной техникой: компьютеры, сканер, принтер.</p>	<p>Сл1. Отсутствие необходимого оборудования для проведения экспериментов.</p> <p>Сл2. Отсутствие интерфейса.</p> <p>Сл3. Нехватка персонала.</p>
<p>Возможности</p> <p>В1. Использование инновационной структуры ТПУ.</p> <p>В2. Заключение хоздоговоров с предприятиями для ремонта изношенных деталей.</p> <p>В3. Появление дополнительной прибыли за счет привлечения спонсоров.</p>	<p>С помощью предоставленного оборудования есть возможность реализовывать проект, выплачивать заработную плату, конкурировать с разработчиками схожей технологии. Также чтобы проект воплотить в производственных масштабах необходима помощь спонсоров. При наличии оборудования можно вывести проект на самоокупаемость за счет заключения хоздоговоров.</p>	<p>Средств ТПУ без дополнительной поддержки спонсоров не достаточно. Из-за нехватки оборудования и группы ученых реализовать проект становится проблематично.</p>
<p>Угрозы.</p> <p>У1. Активное развитие конкурирующих отраслей.</p> <p>У2. Вредное производство.</p> <p>У3. Нехватка финансирования.</p>	<p>Развитие нанотехнологий и их активное финансирование затрудняют продвижение данного продукта на рынке в связи с его моральным устареванием.</p>	<p>Персонал, обладающий необходимыми знаниями и умениями, уходит конкурирующие области из-за повышенного спроса на готовый продукт конкурентов, более высокую заработную плату.</p>

Результаты научно – исследовательской работы могут быть устаревшими, если на рынке появятся материалы с высокими свойствами и низкой стоимостью. На данный момент и результаты работы и сама технология являются конкурентоспособными.

4.3 Планирование научно-исследовательских работ

4.3.1 Структура работ в рамках научного исследования

С оставление этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель Зенин Б.С.
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Чжао Ифань
	3	Проведение патентных исследований	Чжао Ифань
	4	Выбор направления исследований	Руководитель Чжао Ифань
	5	Календарное планирование работ по теме	Руководитель Чжао Ифань
Теоретические и экспериментальные исследования	6	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Чжао Ифань.
	7	Построение макетов (моделей) и проведение экспериментов	Руководитель Чжао Ифань
	8	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	Руководитель Чжао Ифань
	9	<i>Заполняется дипломником самостоятельно</i>	Руководитель Чжао Ифань
Обобщение и оценка результатов	10	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель Чжао Ифань
	11	Определение целесообразности проведения ОКР	Руководитель Зенин Б.С.
<i>Проведение ОКР</i>			
Разработка технической документации и проектирование	12	Разработка блок-схемы, принципиальной схемы	Бакалавр Чжао Ифань
	13	Выбор и расчет конструкции	Бакалавр Чжао Ифань
	14	Оценка эффективности производства и применения проектируемого изделия	Бакалавр Чжао Ифань
	15	<i>Заполняется дипломником самостоятельно</i>	Бакалавр Чжао Ифань
Изготовление и испытание макета (опытного образца)	16	Конструирование и изготовление макета (опытного образца)	Бакалавр Чжао Ифань
	17	Лабораторные испытания макета	Бакалавр Чжао Ифань

Оформление отчета но НИР (комплекта документации по ОКР)	18	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Бакалавр Чжао Ифань
	19	Оформление патента	Бакалавр Чжао Ифань
	20	Размещение рекламы	Бакалавр Чжао Ифань

4.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоёмкости $t_{ожі}$ используется следующая формула [16]:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5},$$

где, $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн;

$t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется 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 %.

$$T_{p_i} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i},$$

где T_{p_i} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$\mathbf{Ч}_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Длительность каждого из этапов работ из рабочих дней:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}},$$

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

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

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}},$$

где, $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

В 2017-ом году $k_{\text{кал}} = 122 / (122 - 34 - 14) = 1,65$

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} необходимо округлить до целого числа.

Все рассчитанные значения свести в таблице 5. На основе таблице 4.5. троится календарный план таблице 4.6.

Таблица 4.5 – Временные показатели проведения научного исследования

Номер работы	Трудоемкость работ						Длительность работ в рабочих днях, T_{pi}		Длительность работ в календарных днях, T_{ki}	
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ожі}$, чел-дни					
	Зенин Б.С.	Чжао И.	Зенин Б.С.	Чжао И.	Зенин Б.С.	Чжао И.	Зенин Б.С.	Чжао И.	Зенин Б.С.	Чжао И.
1	3	3	5	5	4	4	4	4	6	6
2	-	5	-	12	-	8	-	8	-	12
3	-	5	-	12	-	8	-	8	-	12
4	3	3	4	4	3	3	3	3	5	5
5	3	3	5	5	4	4	4	4	6	6
6	-	8	-	13	-	10	-	10	-	15
7	1	-	2	-	1	-	1	-	2	-
8	-	4	-	6	-	5	-	5	-	7
9	2	4	3	6	2	5	2	5	4	4
10	-	1	-	2	-	1	-	1	-	2
11	-	13	-	17	-	15	-	15	-	22
12	-	10	-	13	-	11	-	11	-	17
13	3	3	7	7	5	5	5	5	7	7

Таблица 4.6- Календарный план-график проведения НИОКР по теме - Руководитель. - Дипломник

№ работ	Вид работ	Исполнители	T_{ki} кал. дн.	Продолжительность выполнения работ													
				февр.		март			апрель			май			июнь		
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Составление ТЗ	Руководитель Дипломник	6 6														
2	Изучение литературы	Дипломник	12														
3	Проведение патентных исследований	Дипломник	12														
4	Выбор направления исследований	Руководитель Дипломник	5 5														
5	Календарное планирование работ по теме	Руководитель Дипломник	6 6														
6	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Дипломник	15														
7	Построение макетов (моделей) и проведение экспериментов	Руководитель	2														
8	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	Дипломник	7														
9	Заполняется дипломником самостоятельно	Руководитель Дипломник	4 4														
10	Оценка эффективности полученных результатов	Дипломник	2														
11	Писание отчёт	Дипломник,	22														
12	Готовить другие	Дипломник	17														
13	Проверить отчет	Руководитель	7														

4.3.3 Бюджет научно- технического исследования (НТИ)

4.3.3.1 Расчет материальных затрат НТИ

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m \Pi_i \cdot N_{расхi} ,$$

где, m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

Π_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Таблица 4.7 - Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, Z _м , руб.
компьютер	шт.	1	35000	35000
Бумага формата А4	лист.	2	250	500
Ручка шариковая	шт.	3	80	240
Итого				35740

4.3.3.2 Амортизация основных фондов

Рассчитаем амортизацию оборудования техники $I_{ам.обор}$, по следующей формуле [17]

$$I_{ам.обор} = \left(\frac{T_{исп.обор}}{365} \right) \times K_{обор} \times H_a ,$$

где, $T_{исп.обор}$ – время использования оборудование;

74 дней – количество дней в году;

$K_{обор}$ – стоимость оборудования;

H_a – норма амортизации.

$$N_a = \frac{1}{T_{\text{с.с. обор.}}},$$

где, $T_{\text{с.с. обор.}}$ – срок службы оборудования

Знание, что компьютера срок службы оборудования 5 лет, Флеш-карта срок службы оборудования 5 лет и Картриджа для принтера службы оборудования 1 год.

$$I_{\text{ам. комп}} = (T_{\text{исп. обор.}}/74) * K_{\text{исп. ПМТ-3}} * N_a = (1/74) * 35000 * (1/5) = 95 \text{ руб}$$

4.3.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

Мы знаем, что статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату [18]:

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}},$$

где, $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{\text{осн}}$).

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) руководителя (лаборанта, инженера) от **предприятия** (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p,$$

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

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

$Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d},$$

где, Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб. дней $M=10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. В таблице 4.8.

Таблица 4.8 - Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель
Календарное число дней	40
Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни	15
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	5
Действительный годовой фонд рабочего времени	20

Месячный должностной оклад работника:

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

где Z_{tc} – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от Z_{tc});

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20 % от Z_{tc});

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

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 4.9.

Таблица 4.9 - Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Разряд	k_T	Z_{tc} , руб.	$k_{пр}$	k_d	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	1	0,3	26400	0,3	0,5	1,3	34320	1445	30	43350
Итого $Z_{осн}$										43350

Расчет основной заработной платы руководителя сводится в таблице 4.10.

Таблице 4.10 – Расчет основной заработной платы

№ п/п	Наименование этапов	Трудоемкость, чел.-дн.	Зарботная плата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс. руб.	Всего заработная плата по тарифу (окладам), тыс. руб.
1	Составление темы	6	1445	8670
2	Выбор направления исследований	5	1445	7225
3	Календарное планирование работ	6	1445	8670
4	Проведение прессования и спекания	2	1445	2890
5	Сопоставление результатов	4	1445	5780
6	Проверка ВКР	7	1445	10115
Итого:				43350

4.3.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}$$

где, $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,13).

$$Z_{\text{доп}} = 0,13 \cdot 43350 = 5635$$

4.3.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

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

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 пониженная ставка – 27,1%*.

Отчисления во внебюджетные фонды:

$$Z_{\text{внеб}} = 0,271 \cdot (43350 + 5635,6) = 13275 \text{ руб.}$$

4.3.3.6 Накладные расход

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

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

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

4.3.3.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 4.11.

* Федеральный закон от 24.07.2009 №212-ФЗ «О страховых взносах в Пенсионный фонд Российской Федерации, Фонд социального страхования Российской Федерации, Федеральный фонд обязательного медицинского страхования»

Таблица 4.11 - Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Примечание
1. Материальные затраты НТИ	35740	Пункт 3.3.1
2. Амортизация основных фондов	95	Пункт 3.3.2
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	43350	Пункт 3.3.2
4. Отчисления во внебюджетные фонды	5635	Пункт 3.3.3
5. Отчисления во внебюджетные фонды	13275	Пункт 3.3.4
6. Накладные расходы	15695	Пункт 3.3.5
Бюджет затрат НТИ		113790 руб.