

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

Школа Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки (специальность) Материаловедение и технологии материалов
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Теплофизические условия формирования композиционных газотермических покрытий специального назначения

УДК 621.793-419.8

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ71	Ян Сяо		

Руководитель

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

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Рагозин Д. В.	к. и. н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Исаева Е. С.	-		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
22.04.01 Материаловедение и технологии материалов	Панин С. В.	д. т. н.		

Томск – 2019 г.

Планируемые результаты обучения по ООП 22.04.01

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
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 науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа новых производственных технологий
Направление подготовки (специальность) Материаловедение и технологии материалов
Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

(Подпись) (Дата) С. В. Панин

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ71	Ян Сяо

Тема работы:

Теплофизические условия формирования композиционных газотермических покрытий специального назначения	
Утверждена приказом директора ИШНПТ	Приказ № 2776/с от 10.04.2019

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

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>	<i>В работе был исследован процесс формирования отдельного слоя материала методом лазерного аддитивного плавления. Рассмотрены особенности формирования отдельного слоя и выполнено физическое и математическое моделирование процесса.</i> <i>Из-за сложности экспериментального исследования условий формирования отдельного слоя при аддитивном производстве, при анализе использовалось численное моделирование процесса, в связи с чем негативное воздействие на окружающую среду отсутствует.</i> <i>При реализации численного моделирования процесса аддитивного лазерного плавления в качестве модельных материалов использовались Ti, Al, Ni.</i> <i>Численное моделирование проводилось при помощи компьютерной программы, написанной на основании разработанных моделей.</i>
---	---

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов (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).	1. Литературный обзор, включающий характеристику особенностей теплофизических условий формирования композиционных газотермических покрытий специального назначения. 2. Разработать физическую и математическую модели процессов, протекающих при обработке порошка газотермическим формированием. Посчитать температуру в контакте. 3. Провести анализ результатов численного моделирования, выявить зависимости газотермическим формированием. 4. Обсуждение результатов работы. 5. Дополнительные разделы: «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение», «Социальная ответственность».
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)	Презентация ВКР в Power Point
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент	Д. В. Рагозин, старший преподаватель, ТПУ
Социальная ответственность	Е. С. Исаева, старший преподаватель, ТПУ
английский язык	А. Н. Валерьевна, доцент, ТПУ
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Введение	
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	Зенин Б. С.	к. ф.-м. н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ71	Ян Сяо		

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

Школа Инженерная школа новых производственных технологий

Направление подготовки (специальность) Материаловедение и технологии материалов

Уровень образования магистр

Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

Период выполнения _____ (осенний / весенний семестр 2018/2019 учебного года)

Форма представления работы:

магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

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

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
30.01.2019	1. Литературный обзор	20
30.02.2019	2. Экспериментальная часть	20
30.04.2019	3. Обсуждение результатов и оформление работы	30
01.03.2019	4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсоемкость	10
17.04.2019	5. Социальная ответственность	10
21.05.2019	6. Обязательное приложение на иностранном языке	10

Составил преподаватель:

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

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
22.04.01 Материаловедение и технологии материалов	Панин С. В.	д. т. н.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 105 с., 42 рис., 19 табл., 20 источников, 1 прил.

Ключевые слова: газотермическое напыление, материал частицы, материал подложки, теплофизические условия, кинетическая энергия, скорость частицы, температура в контакте

Объектом исследования является (ются) процесс формирования многослойного покрытия в процессе газотермического напыления.

Цель работы – исследовать ключевые факторы, влияющие на температуру в контакте при разных скоростях для разных материалов.

В процессе исследования проводились изучение одного из главных условий, определяющих адгезию (когезию) покрытий – температуры на границе напыленной частицы – подложка. Провести для выбранных материалов и экзотермически реагирующих порошков чистых металлов и сплавов расчет контактной температуры на границе «напыляемая частица – основа» при различных режимах напыления.

В результате исследования проведено сравнение температурных условий формирования покрытий при газотермическом напыления (ГТН) и холодном газодинамическом напыления (ХГН). Рассчитаны температуры в контакте напыленной частицы – основа (подложка).

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: в рамках разработанной модели можно определять технологические характеристики процесса формирования покрытий.

Степень внедрения: проведено исследование.

Область применения: газотермическое напыление применяют для создания на поверхности деталей и оборудования функциональных покрытий - износостойких, коррозионностойких, антифрикционных, антирадарных, теплостойких, термобарьерных, электроизоляционных, электропроводных, и т. д.

Экономическая эффективность/значимость работы недоступна так как количественная оценка экономической эффективности затруднена в силу случайного характера рассматриваемого процесса формирования покрытий.

В будущем планируется дальнейшее исследование процесса лазерной обработки материала и дальнейшее совершенствование математической модели, позволяющей проводить расчеты оптимальных технологических параметров сложных технологических процессов аддитивного производства.

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

В данной работе использованы следующие термины с соответствующими определениями:

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

Скрытая теплота — теплота, высвобождаемая или поглощаемая термодинамической системой при изменении своего состояния, но не сопровождаемая изменением температуры.

Модель – упрощённое представление действительного объекта и протекающих в нём процессов.

Адгезия – возникновение связи между поверхностными слоями двух разнородных тел, приведённых в соприкосновение.

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ 12.1.005 – 88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
2. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
3. ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление (с Изменением N 1).
4. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.
5. ГОСТ 1639-2009. Лом и отходы цветных металлов и сплавов. Общие технические условия
6. ГОСТ 2787-75. Металлы черные вторичные. Общие технические условия.

7. ГОСТ 17.2.3.02-78. Охрана природы. Атмосфера. Правила установления допустимых выбросов вредных веществ промышленными предприятиями.
8. ГОСТ 12.2.032-78. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
9. СН-245-71. Санитарные нормы проектирования промышленных предприятий.
10. СН-181-70. Указания по проектированию цветовой отделки интерьеров производственных зданий промышленных предприятий.
11. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
12. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.
13. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.
14. СНиП II-4-79. Естественное и искусственное освещение.
15. СНиП 2.01.02-85. Противопожарные нормы.

Оглавление

1 Обзор литературы	13
1.1 Газотермическое покрытие	13
1.1.1 Особенности формирования покрытия (частица – подложка)	14
1.1.2 Главные условия взаимодействия частицы с подложкой.....	16
1.1.3 Виды напыления порошковых покрытий	20
1.1.4 Сравнительные характеристики различных видов напыления.....	25
1.1.5 Особенности взаимодействия нагретый частиц с нагретой подложкой	27
1.1.6 Понятие адгезии	29
1.2 Покрытие специального назначения	32
1.3 Частица на подложке и температура в контакте	37
2 Объект и методы исследования	38
2.1 Материалы исследования	38
2.2 Условия напыления частиц (температура и скорость)	40
2.3 Расчет температуры в контакте с учетом скорости частиц.....	40
3 Результаты проведенного исследования.....	43
3.1 Особенности температурных условий в контакте при формировании многослойных покрытий при газодинамическом напылении.....	43
3.2 Исследование зависимости температуры в контакте от критерия тепловой активности частицы	50
3.3 Сравнительный анализ T_k для ХДН и ГТН	55
3.4 Влияние процесса СВС на температурные условия формирования покрытия при газотермическом и холодном газодинамическом напылении	55
3.5 Исследование влияния процесса окисления поверхности напыляемых частиц на температуру в контакте частица-подложка	62
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	69
5 Социальная ответственность.....	84
Заключение	102
Список использованных источников	103

Введение

Порошковой металлургией называется отрасль науки, которая охватывает различные методы изготовления порошков металлов, металлоподобных соединений, сплавов, полуфабрикатов и всевозможных изделий из них или смесей с неметаллическими порошками без возможности расплавления основного компонента в металле.

Сейчас практически не существует такой отрасли в промышленности, где бы ни применяли материалы, полученные методами порошковой металлургии. Кроме того, существуют даже расценки на изготовление металлоконструкций. Таким образом, в обрабатывающей промышленности порошковая металлургия представляет твердосплавные инструменты, в горнодобывающей - это различные армирующие твердые сплавы, применяемые для оснащения бурового инструмента. В сварочном производстве это порошки для наплавки, специальной резки или изготовления образцов.

Порошковая металлургия отличается множеством достоинств. Основными достоинствами являются:

- получение материалов, которые довольно трудно или вообще невозможно получить другими методами. Например, существуют некоторые виды тугоплавких металлов, сплавов или композиций на их основе, а также композиций металлов, которые не смешиваются в расплавленном виде или при температуре плавления;

- получение некоторых материалов и изделий с наиболее высокими техническими и экономическими показателями. Это достигается за счет экономии металла и существенного снижения себестоимости материала;

- возможность получать материалы с наименьшим содержанием примесей, а также с точным соответствием составу, который необходим, по сравнению с литыми сплавами за счет изначального применения чистых порошков.

Однако наряду с достоинствами, порошковая металлургия имеет и свои недостатки, которые препятствуют ее развитию. К ним относятся:

- довольно высокая стоимость порошков;
- сложность в изготовлении изделий больших размеров;
- спекание в обязательном порядке должно проходить в защитной атмосфере, что, в свою очередь, увеличивает себестоимость готовых изделий;
- применять необходимо только чистые исходные порошки для того, чтобы получить чистые металлы;
- достаточно сложно получить металлы и сплавы в компактном состоянии.

В порошковой металлургии достоинства и недостатки - это величины не постоянные, они зависят от состояния и развития, как основной отрасли, так и других. Порошковая металлургия может со временем вытесняться из одних областей в другие, но все же достоинства - это действующие аспекты в металлургии, поэтому она сохранит свою значимость и в дальнейшем развитии.

Кроме этого, мы используем порошки для получения напыления газотермического покрытия.

Традиции по производству металла и различных машиностроительных изделий складывались еще с давних времен. Ежегодно разрабатывались и внедрялись новейшие технологии, все более совершенные способы литья, новые методы резания металлов. Методы совершенствовались, но до сих пор оставался один недостаток - это довольно много стадий обработки. Таким образом, возможна потеря сырья, энергии и других ресурсов на всех этапах.

Порошковая технология не сводится только к тому, что производит детали из металлических порошков. Такой метод, как напыление на поверхность металла слоя из стойких материалов тоже не менее важно. Как правило, напыление делается из тугоплавких, коррозионностойких и износостойких материалов.

Благодаря данному методу, появилась возможность полностью восстанавливать детали, которые были изношены. Поэтому такой процесс

намного выгоднее, чем обычная наплавка, ведь с применением напыления не нужна процедура корабления деталей, а напыляемый материал находит наиболее эффективное применение в дальнейшем.

Напыление металлических порошков очень резко сокращает возможные потери металла от коррозии. Это особенно популярно и востребовано, потому что убытки, связанные с коррозией, составляют огромный процент от национального дохода. Сокращение интенсивности износа деталей позволяет охранять окружающую среду, потому что в процессе значительно снижается поступление в воздух мелких частиц, металла и других вредных материалов.

Нанесение покрытий осуществляется различными способами. К ним относятся вакуумные методы, газотермические методы и ионная имплантация. В этом случае в процессе обработки поверхностей ионами при небольших дозах облучения происходит не образование покрытия, а внедрение ионов в, так называемые, приповерхностные слои изделия. Стоит отметить, что совершенно недавно разработанные методы нанесения покрытий позволяют добиться долговечности и надежности машин и оборудования, снижения материалоемкости и экономии любых видов ресурсов.

1 Обзор литературы

1.1 Газотермическое покрытие

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 [1]. 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.

Под общим названием газотермическое напыление (ГТН) объединяют следующие методы: газопламенное напыление, высокоскоростное газопламенное напыление, детонационное напыление, плазменное напыление, напыление с оплавлением, электродуговая металлизация, активированная электродуговая металлизация. Каждому из методов соответствуют определенные значения температуры и скорости частиц (рис. 1).

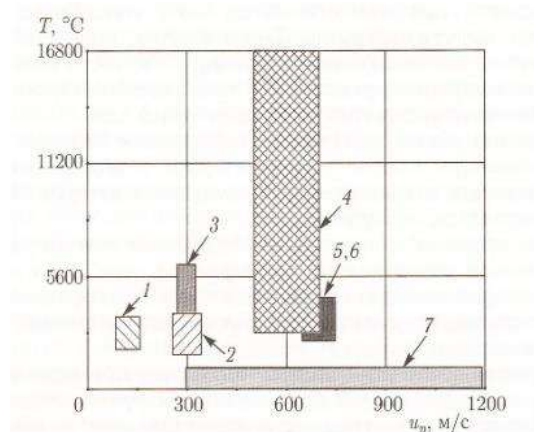


Рисунок 1 - Диаграмма используемых значений температуры T и скорости частиц сравнения различных методов напыления. 1-низкоскоростной газопламенный, 2-высокоскоростной газопламенный, 3- электродуговой, 4- плазменный, 5,6- детонационный и высокоскоростной жидкотопливный [2].

В последнее время была предложена новая технология - холодное газодинамическое напыление (ХГН) [2]. В основе данной технологии лежит процесс формирования металлических покрытий при соударении холодных (с температурой, существенно меньшей температуры плавления) металлических частиц, ускоренных сверхзвуковым газовым потоком до скорости несколько сот метров в секунду, с поверхностью обрабатываемой детали. Основным энергетическим источником в этом случае является кинетическая энергия напыляемых частиц. Минимальное тепловое взаимодействие частиц с окружающей средой обеспечивает повышенное качество получаемого покрытия.

1.1.1 Особенности формирования покрытия (частица – подложка)

Газотермическое покрытие (ГТП) - это слоистый материал, состоящий из сильно деформированных напыленных частиц, соединенных между собой по контактными поверхностями, на которых произошло химическое взаимодействие [3]. Обозначим диаметр пятна химического взаимодействия D_x , тогда его площадь $F_x = \frac{1}{4}D_x^2\pi$, рисунок 2.

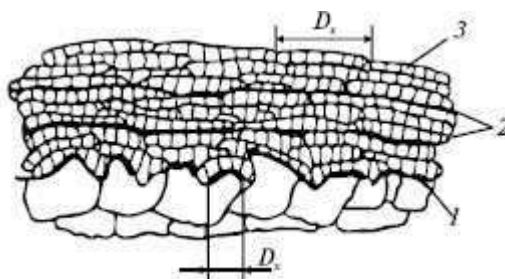


Рисунок 2 - Схема структуры ГТП: 1 - граница между покрытием и подложкой; 2 - граница между слоями; 3 - граница между частицами в слое; D_x - диаметр пятна поверхности контакта, на котором произошло приваривание частиц [1]

Пятна химического взаимодействия площадью F_x не заполняют всю площадь контакта (или контактной поверхности) между частицами, и поэтому

прочность и плотность покрытий ниже прочности и плотности материала покрытия в компактном состоянии. Прочность в самих пятнах химического взаимодействия зависит от количества очагов схватывания, образовавшихся на площади пятна F_x и представляющих собой сварные участки небольшого размера, рисунок 3.

Очаги схватывания имеют высокую прочность, и разрушение в них происходит с вырывом одного из соединяемых материалов, а не по границе частица-подложка или частица-частица. Очаги схватывания возникают во время удара, деформации и затвердевания частицы, а их количество определяется уровнем развития химического взаимодействия материалов в контакте. Чем больше очагов схватывания, тем выше прочность сцепления покрытия с подложкой [3].

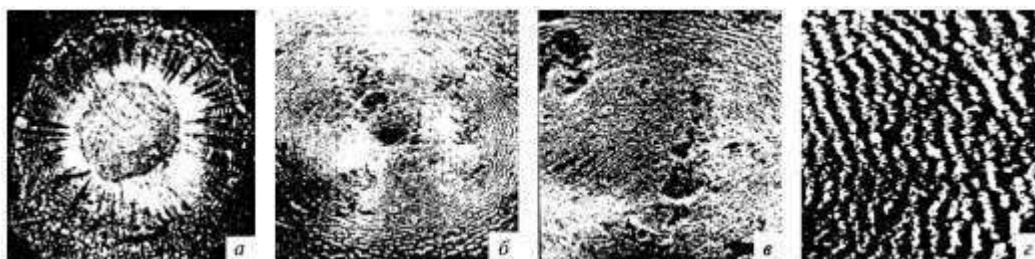


Рисунок 3 - Фрактография поверхности (Ag) под приваренной частицей (Ag) после отрыва: а - в центре площади контакта видна область приваривания частицы Dx (x300); б - область Dx заполнена очагами схватывания, видны вырывы металла при снятии частицы (x800); в - очаги схватывания (x1000); г - очаги схватывания (x3000)

Обозначим температуру частицы T_1 , а температуру подложки T_2 . Приваривание частицы наступает только при подогреве подложки до определенной температуры, которую обозначим T_2' и назовем температурой химического взаимодействия. Эта температура соответствует заполнению контактной поверхности под частицей очагами схватывания на 40-70 %. При таком заполнении химическое взаимодействие частиц с подложкой происходит на большой площади контакта, и для их удаления необходимо прикладывать значительное усилие [7].

Взаимодействие частицы с напыляемой поверхностью является элементарным процессом, который лежит в основе всего процесса формирования покрытия и который во многом определяет его свойства. В покрытии можно выделить структурные элементы, которые отражают процессы его формирования и разделены между собой границами раздела с определенными свойствами.

Сцепление покрытия с подложкой называют адгезией, а сцепление частиц между собой в покрытии - когезии.

При испытании на равномерное растяжение разрушение покрытий чаще всего носит адгезионно-когезионный характер. Поэтому такие испытания называют испытаниями на прочность сцепления, и характеристикой прочности связи покрытия с подложкой является прочность сцепления

$$\sigma_{\text{сц}} = P/F [\text{МПа}], \quad (1)$$

где P -разрушающая нагрузка, Н; F -площадь поверхности образца, м^2 . Экспериментально процесс взаимодействия отдельной частицы с основой при ГТН исследовать очень сложно из-за короткого времени (микросекунды) протекания процесса и поэтому при описании этого процесса пользуются расчетами.

1.1.2 Главные условия взаимодействия частицы с подложкой

При напылении расплавленные частицы ударяются о более холодную поверхность с последующим растеканием, одновременным деформированием и затвердеванием [5]. В начальный момент удара сферическая частица, сплющиваясь под действием сил инерции, растекается по поверхности от места первичного контакта. Вместе с круговым поверхностным растеканием происходит теплоотдача от материала частицы в направлении, перпендикулярном поверхности основы, и в этом же направлении распространяется фронт затвердевания.

Оба этих процесса протекают в течение времени, необходимого для перемещения верхней точки C_1 расплавленной частицы, через положение C_2 к конечному положению C_3 на поверхности затвердевшей частицы, рисунок 4. Соответственно этому крайняя точка частицы C_1' перемещается по поверхности в положение C_2' и C_3' , формируя круговой край затвердевшей частицы.

По мере растекания уже затвердевшая часть материала частицы получает давление со стороны еще не кристаллизовавшегося, жидкого объема, за счет чего прижимается к поверхности основы до момента полного, затвердевания. Поэтому затвердевшая частица при напылении под прямым углом на плоскую поверхность, из исходной сферической формы диаметром d приобретает форму диска диаметром D и толщиной h с отношением $h/d \approx 0,05...0,1$. В действительности форма частиц становится более сложной, т.к. они попадают в покрытие под различными углами, на шероховатую поверхность.

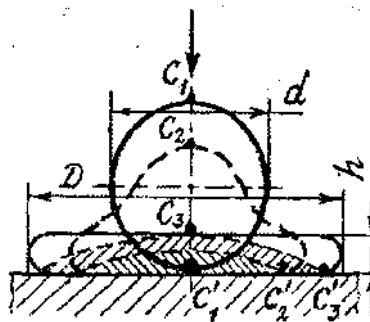


Рисунок 4 - Схема деформации и одновременного затвердевания (заштрихована твердая фаза) расплавленной частицы при ударе о плоскую поверхность [5]

Процесс затвердевания и охлаждения частицы в реальном процессе напыления с достаточной точностью [5] описывается без учета возможного перегрева частиц сверх температуры их плавления $T_{пл}$. При этом можно произвести качественную и количественную оценки термических циклов $T_k(\tau)$ в контактной зоне.

В момент τ_1 касания расплавленной частицей поверхности основы начинается распространение фронта затвердевания навстречу

деформирующейся частице. По истечении времени $\tau_1 > \tau_2$ толщина затвердевшего слоя достигает координаты $h(\tau_2; 0)$ на расстоянии r от оси частицы и высоты $h(\tau_2; r)$ на расстоянии r от оси частицы с увеличением диаметра круговой границы затвердевшего слоя. Через некоторое время $\tau_3 > \tau_2$ толщина увеличивается до координаты $h(\tau_3; r)$ при возрастании диаметра затвердевания. Кристаллизация и растекание частицы заканчиваются за время τ_0 в момент встречи точки С растекающейся частицы с движущимся ей навстречу фронтом затвердевания на уровне координаты $h(\tau_0; 0)$, что определяет толщину h затвердевшей частицы и ее диаметр D .

В момент соприкосновения частицы с основой, имеющей температуру T_0 , в точке контакта возникает температура T_k , подвижный фронт начавшейся кристаллизации несет температуру плавления материала частицы $T_{пл}$ [5]. При увеличении расстояния от фронта кристаллизации температура и частицы, и основы резко снижаются, проходя через определенное значение T_k . С течением времени $\tau_1 - \tau_3$ темп этого снижения замедляется (увеличивается угол между линией снижения и осью температур) так что вблизи точки контакта и частица, и основа успевают прогреться до более высоких температур.

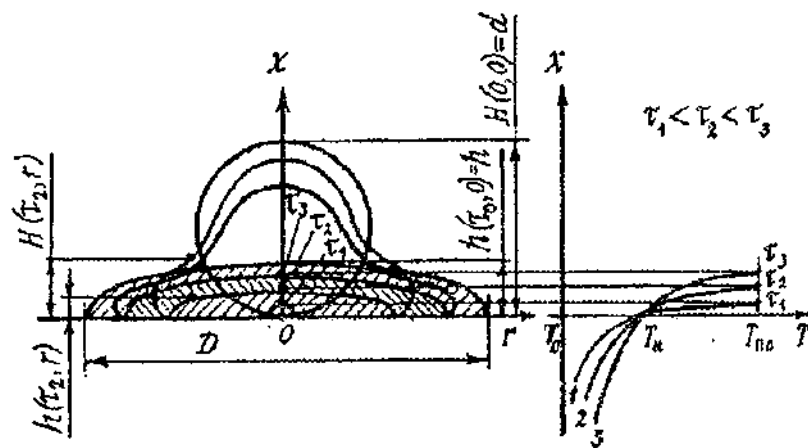


Рисунок 5 - Распределение температуры в различные моменты времени $T_1 < T_{11} < T_{111}$ в системе твердения основы с температурой T_0 и расплавленная при температуре плавления $T_{пл}$

После затвердевания величины температуры контакта T_k и температуры частицы быстро уменьшаются вследствие интенсивной теплоотдачи частицы в основу до полного их выравнивания с температурой основы T_0 .

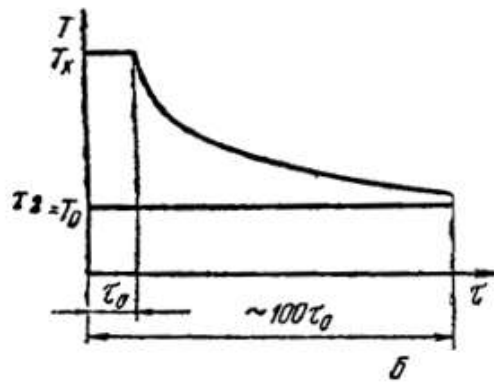


Рисунок 6 - Схема термического цикла в контакте [7]

Таким образом, термический цикл $T_k(\tau)$ сферической частицы при ударе, деформации и затвердевании на поверхности включает два основных этапа, рисунок 6:

1. затвердевание частицы в течении времени τ_0 , когда величина T_k остается постоянной благодаря тому, что над подвижным фронтом кристаллизации $h(\tau, r)$ находится жидкий расплав;

2. охлаждение затвердевшей частицы до температуры основы T_0 .

Подогревая изделие и увеличивая значение T_0 , можно повысить температуру контакта T_k и интенсифицировать процесс приваривания частиц.

На первой стадии, при затвердевании частицы величина T_k остается постоянной за счет воздействия теплофизических параметров по формуле [11]:

$$T_k = \frac{T_{пл} K_s}{K_\varepsilon + \Phi(\alpha)} \quad (2)$$

где T_k - температура контакта;

$T_{пл}$ - температура плавления материала частицы;

K_ε - критерий тепловой активности материала частицы по отношению и основы: $K_\varepsilon = \lambda_1 / \lambda_2 \sqrt{\alpha_1 \alpha_2}$;

$\alpha_1 \alpha_2$ – коэффициенты температуропроводности материала частицы и основы;

$\Phi(\alpha)$ – функция интеграла вероятности: $\alpha = f(K_\varepsilon; K_L)$;

α - корень уравнения:

$$K_{\varepsilon} + \Phi(\alpha) = K_L \frac{e^{-\alpha^2}}{\alpha} \quad (3)$$

K_L - критерий теплоты плавления L материала частицы:

$$K_L = \frac{C_1 T_{m1}}{1,77L} \quad (4)$$

C_1 - теплоемкость материала частицы.

Величине α устанавливается графически по имеющейся экспериментальной номограмме, в зависимости от точки пересечения кривых изменения значений K_{ε} K_L .

1.1.3 Виды напыления порошковых 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 [1]. 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.

Общим для всех газотермических покрытий является наличие диспергированного напыляемого материала, ускоряемого газовой струёй. Термин «газотермические технологии» в настоящее время объединяет следующие способы нанесения покрытий:

Газопламенное напыление проволокой или стержнями

При газопламенном напылении проволокой или стержнями распыляемый материал непрерывно подаётся в центр ацетилен-кислородного пламени и там

оплавляется [6]. С помощью распыляющего (диспергирующего) газа, например, сжатого воздуха или азота, расплавленные капли выдуваются из зоны плавления и ускоряются в направлении подготовленной детали. Газопламенное напыление проволокой является одним из самых распространенных способов с очень высоким качеством покрытия. В автомобилестроении ежегодно более сотни тонн молибдена напыляется на вилки переключателей, кольца синхронизации и поршневые кольца. Термическая энергия: макс 3160К; кинетическая энергия: до 200 м/сек; производительность 6-8кг/час.

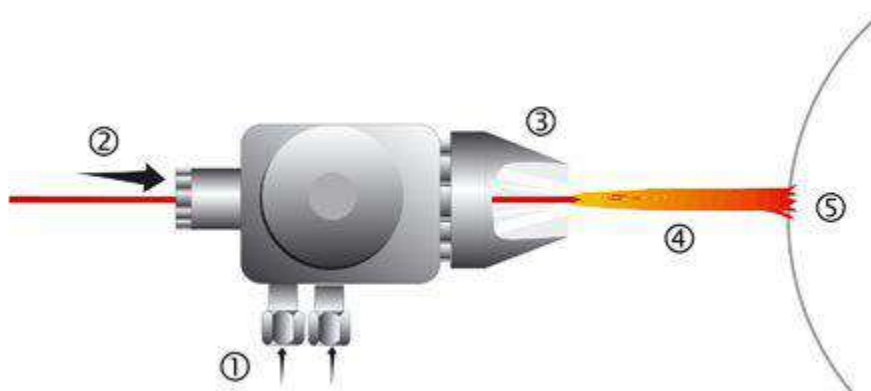


Рисунок 7 - Газопламенное напыление проволокой

1 - Ацетилен/Кислород; 2 - Проволока или стержень; 3 – Сопло; 4 - Ацетилен/кислородное пламя и напыляемый материал; 5 – Деталь [6]

Газопламенное напыление порошком

При газопламенном напылении порошком порошкообразные частицы напыляемого материала плавятся или оплавляются в ацетилен-кислородном пламени и с помощью расширяющегося горючего газа ускоряются в направлении подготовленной поверхности детали [6]. Если требуется, то для ускорения порошка можно использовать ещё дополнительный газ (например, аргон или азот). Существует более 100 различных порошковых материалов. Среди порошков различают самофлюсующиеся и терморреагирующие порошки. Для самофлюсующихся обычно требуется дополнительная термообработка оплавлением ацетилен-кислородной горелкой. Терморреагирующие порошки используют для подслоя, увеличивающего прочность сцепления покрываемой поверхности и основного покрытия. Терморреагирующими их называют в связи с

тем, что исходная частица состоит из двух «склеенных» частичек разнородных материалов, которые при нагревании в газовой струе вступают в реакцию образования интерметаллида с выделением тепла, например, Ni-Al, Al-Fe и т.д.

Области применения: втулки переключения, ролики рольгангов, посадочные места подшипников, вентиляторы, роторы шнеков и т.д.
Термическая энергия: макс 3160К; кинетическая энергия: до 50м/сек;
производительность 1-6кг/час.

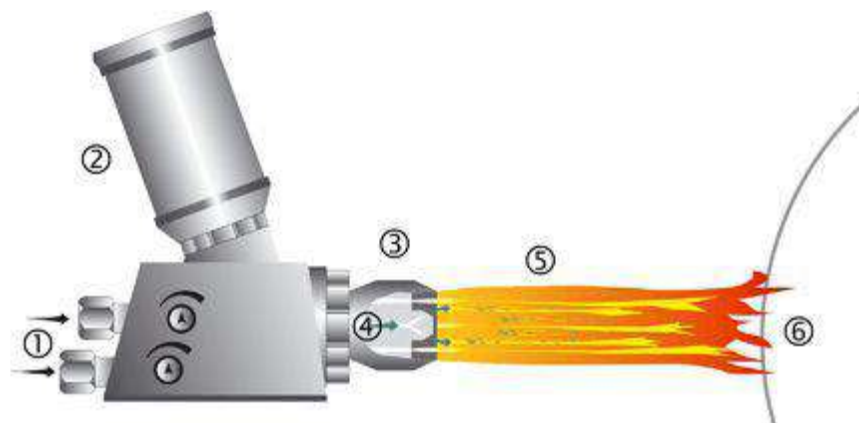


Рисунок 8 - газопламенное напыление порошком; 1 - Ацетилен/Кислород; 2 - Ёмкость с порошком; 3 – Сопло; 4 - Газ + Порошок; 5 - Ацетилен-кислородное пламя и напыляемые частицы; 6 – Деталь [6]

Сверхзвуковое газопламенное напыление (HVOF)

При сверхзвуковом газопламенном напылении происходит постоянное горение газа при высоком давлении внутри камеры сгорания, на ось которой подаётся порошкообразный напыляемый материал [6]. Создаваемое высокое давление в камере сгорания смесью горючего газа и кислородом обеспечивает дальше в профилированном сопле необходимую высокую скорость газового потока. Благодаря этому напыляемые частицы ускоряются до больших скоростей, что ведёт к образованию чрезвычайно плотных и с отличной адгезией покрытий. Достаточная, но медленно вводимая температура приводит в процессе напыления к только незначительным металлургическим изменениям, например, минимальное образование твёрдого раствора карбидов. При этом способе напыления получают экстремально тонкие покрытия с высокой точностью размеров.

В качестве горючих газов можно использовать пропан, этан, ацетилен, водород и другие газы.

Применение: поверхности скольжения в парогенераторах, вальцы фотоиндустрии, детали нефтехимического и химического оборудования, например, насосы, шиберы, шаровые краны, механические уплотнения и т.д. Термическая энергия: макс 3160К; кинетическая энергия: до 550м/сек; производительность 2-8кг/час.

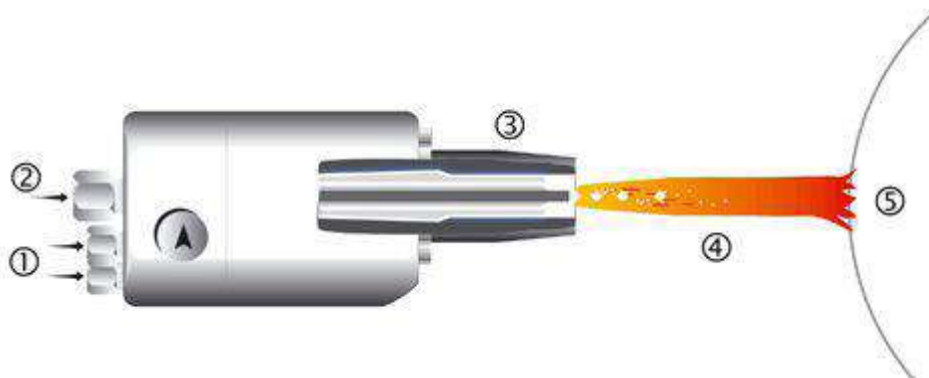


Рисунок 9 - Сверхзвуковое газопламенное напыление; 1 - горючий газ/кислород; 2 - Порошок + газ; 3 - Сопло с или без охлаждения водой; 4 - Горючий газ/кислородное пламя и напыляемые частицы; 5 – Деталь [6]

Детонационное напыление

Напыление ударом пламенем является прерывистым периодическим процессом напыления. Так называемые детонационные пушки состоят из выходной трубы, на конце которой находится камера сгорания [6]. В неё вводится газопорошковая (ацетилен-кислород-порошок) смесь, поджигаемая искрой. Образующаяся в трубе ударная волна ускоряет напыляемые частицы. Они нагреваются в фронте пламени, ускоряются до высоких скоростей в направлении подготовленной детали. После каждой детонации производится очистка камеры и трубы азотом. Очень высокое качество покрытий оправдывает во многих случаях высокие финансовые расходы.

Применение: плунжеры насосов в газовых компрессорах или насосах, рабочее колесо в паровых турбинах, газовый компрессор или расширительная турбина, накатные вальцы бумажных машин или каландровые вальцы.

Термическая энергия: макс 3160К; кинетическая энергия: до 1000м/сек;
производительность 3-6кг/час.

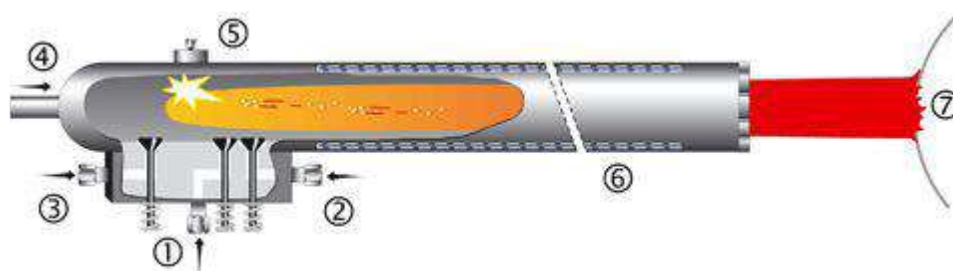


Рисунок 10 - Детонационное напыление; 1 – Ацетилен; 2 – Кислород; 3 – Азот; 4 -
Напыляемый порошок; 5 - Устройство поджига; 6 - Выходная труба с водяным охлаждением;
7 – Деталь [6]

Плазменное напыление

При плазменном напылении порошок внутри или снаружи плазменного пистолета плавится плазменной струёй и ускоряется в направлении покрываемой детали [6]. Плазма генерируется электрической дугой, горящей в аргоне, гелии, азоте, водороде или их смеси. При этом происходит диссоциация и ионизация газов, они приобретают высокую скорость на выходе, и при рекомбинации отдают своё тепло напыляемым частицам.

Электрическая дуга горит между центральным катодом и водоохлаждаемым анодом. Этот способ используется при нормальной атмосфере, в защитном газе (например, аргоне), в вакууме и под водой. При соответствующем профилировании сопла возникает также сверхзвуковая плазма.

Применение: авиа- и космическая промышленность (например, лопатки турбин, плоскости входа) медицина (имплантанты), термобарьерное покрытие. Термическая энергия: до 20000К; кинетическая энергия: до 450м/сек; производительность 4-8кг/час.

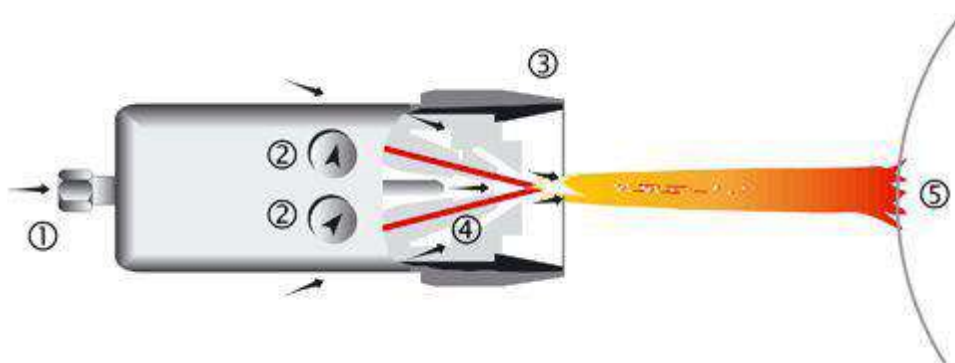


Рисунок 11 - Плазменное напыление; 1 - Инертный газ; 2 - Охлаждающая вода; 3 - Постоянный ток; 4 – Порошок; 5 – Катод; 6 – Анод; 7 – Деталь [6]

Электродуговая металлизация

При электродуговой металлизации две проволоки одинаковые или разные по составу плавятся электрической дугой, горящей между ними, и распыляющим (диспергирующим) газом, например, воздухом ускоряется в направлении покрываемой детали [6]. Электродуговая металлизация процесс напыления с высокой производительностью, но пригоден только для распыления электропроводящих материалов. Перспективным является использование термореагирующих порошковых проволок. При использовании при распылении азота или аргона окисление материалов не происходит.

Применение чрезвычайно широкое, например, покрытие ёмкостей, коррозионная защита металлоконструкций, восстановление изношенных деталей машин и механизмов и т.д. Термическая энергия: до 4000К; кинетическая энергия: 150м/сек; производительность 8-20кг/час.

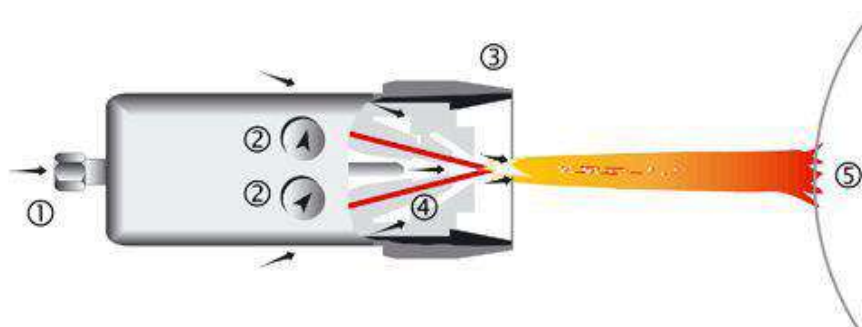


Рисунок 12 – Электродуговая металлизация; 1 – Распыляющий газ; 2 – Подача проволоки регулируемая; 3 – Сопло; 4 – Электропроводящая проволока; 5 – Деталь

1.1.4 Сравнительные характеристики различных видов напыления

Напыление представляет собой процесс нанесения покрытия на поверхность детали с помощью высокотемпературной скоростной струи, содержащей частицы порошка или капли расплавленного напыляемого материала, осаждающиеся на основном металле при ударном столкновении с его поверхностью. Историю развития технологии газотермического напыления покрытий можно проследить через разработку новых методов напыления, главной задачей которых является повышение скорости напыляемых частиц.

Процесс газотермического напыления покрытий представляет собой сложную совокупность физико-химических и механических явлений. Его можно разделить на два основных этапа: формирование двухфазного потока (газовой струи с дисперсными частицами) и формирование самого покрытия.

С научной точки зрения, скорость частиц (v) и температура частиц (T) вместе с характеристиками материала частиц являются основными параметрами, влияющими на формирование покрытия. Скорость и температура частиц влияют на эффективность.

Особенностью методов газотермического напыления (ГТН) является то, что получаемое покрытие формируется из направленного потока дисперсных частиц со средним размером 10-200 мкм. Структура материала покрытия формируется при ударе, деформации и затвердевании нагретых частиц на поверхности основы (подложки) или предыдущих остывших частиц. При этом образуется слоистый материал, состоящий из деформированных частиц, соединенных контактными участками [7].

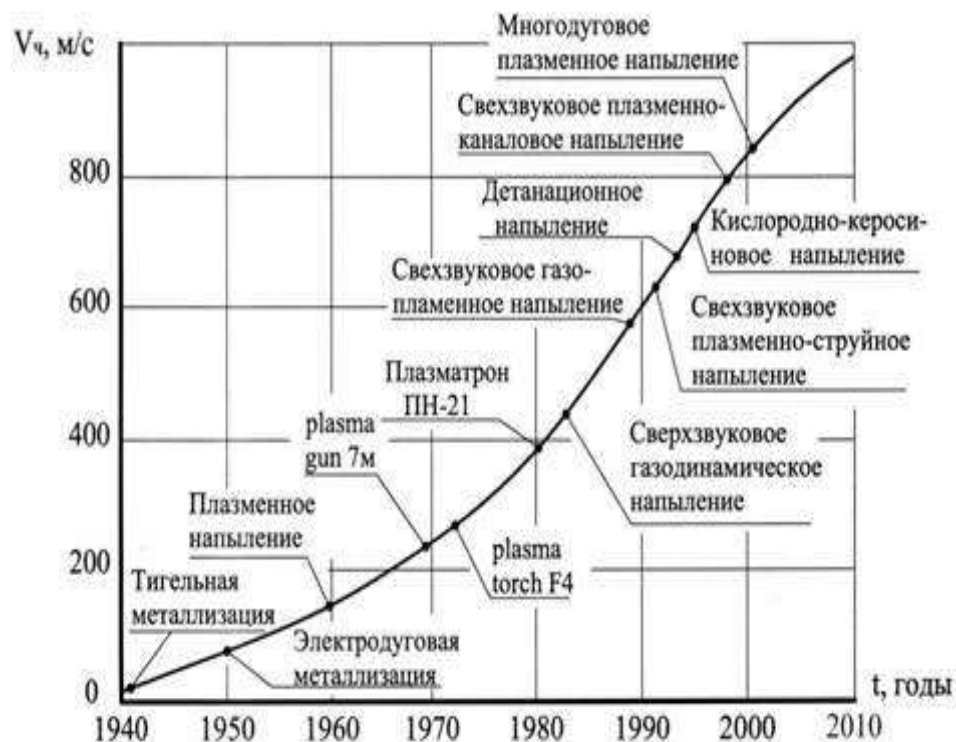


Рисунок 13 - Хронологическая зависимость скорости частиц порошка для некоторых способов газотермического напыления [9]

1.1.5 Особенности взаимодействия нагретый частиц с нагретой подложкой

Физическая природа контактных процессов, обеспечивающих образование прочного сцепления материалов при газотермическом напылении покрытий (ГТН), основана на явлении структурно-энергетической адаптации материалов, контролирующем формирование в зоне контакта устойчивых диссипативных структур. При этом для всех сочетаний материалов и рабочих сред существуют оптимальные диапазоны температуры подложки и частицы, соотношение их характерных геометрических размеров и скоростей соударения, в пределах которых физико-химическое взаимодействие напыляемых материалов является экстремально интенсивным, что обеспечивает максимальные показатели свойств формирующихся покрытий. Зона контакта является областью, в которой реализуются взаимопротивоположные процессы активации (термической, механохимической, радиационной) и пассивации (адсорбции, хемосорбции, взаимодействия в твердой фазе). Поскольку повышение температуры основы интенсифицирует протекание активационных и

пассивирующих процессов, в зоне контакта может находиться окисная пленка, препятствующая образованию металлических связей между напыляемыми материалами. В то же время влияние окисной пленки на контактную температуру может быть пренебрежимо малым. Специфические особенности строения порошковой основы (либо напыленного подслоя) обуславливают повышенную тепловую и химическую активность поверхности сравнении с компактными материалами [10]. Поэтому для обеспечения экстремально высоких свойств покрытия необходимо проанализировать совместное влияние температуры, пористости и степени окисленности подложки на кинетику протекания химической реакции взаимодействия напыляемых материалов в зоне контакта.

В последнее десятилетие отмечается повышенный интерес к напылению покрытий из оксидов металлов (Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , Cr_2O_3 , и др.). Отмечается, что повышение качества и улучшение структуры напыляемых материалов во многом зависят от понимания процессов, происходящих при взаимодействии расплавленных частиц, транспортируемых высокотемпературной струей, с основой. Поскольку данная проблема далека еще от полного решения, целесообразно обсудить и сформулировать ряд вопросов и возникающих задач. Характерные особенности данной системы Малые размеры частиц расплава, большие скорости их соударения с поверхностью подложки и напыляемого покрытия и, как следствие, наличие факторов, существенно затрудняющих анализ протекающих при этом процессов. В этой связи представляется актуальным дальнейшее развитие представлений о гидродинамике и теплофизике взаимодействия расплавленной частицы с поверхностью. Поскольку детальное экспериментальное исследование большинства процессов, протекающих внутри капли расплава и в приповерхностных слоях основы (подложки или напыляемого покрытия), крайне затруднено, единственный путь проведение вычислительного эксперимента в сочетании с развитием модельных аналитических решений. Создание теоретических основ данного явления

представляется чрезвычайно актуальны для корректной интерпретации экспериментальных данных, их критериального обобщения и способствует развитию физико-математических моделей нестационарного сопряженного кондуктивно-конвективного теплообмена и фазовых превращений при соударении микрокапель расплавов с поверхностью.

Видно, что в открытой атмосфере высокие температуры вызывают частицы и подложки окисление с образованием оксидной пленки. Мы не знаем, является ли этот эффект положительным или отрицательным. С одной стороны, оксидная пленка предотвратит дальнейшее окисление материала и защитит материал от коррозии. С другой стороны, мы не понимаем влияния оксидов на покрытие. Мы только понимаем роль чистого вещества сегодня. Одним из важных факторов в измерении эффективности покрытий является адгезия.

1.1.6 Понятие адгезии

Адгезия в физике - сцепление поверхностей разнородных твёрдых и жидких тел. Адгезия обусловлена межмолекулярными взаимодействиями (Ван-дер-Ваальсовыми, полярными, иногда - взаимной диффузией) в поверхностном слое и характеризуется удельной работой, необходимой для разделения поверхностей. В некоторых случаях адгезия может оказаться сильнее, чем когезия, то есть сцепление внутри однородного материала, в таких случаях при приложении разрывающего усилия происходит когезионный разрыв, то есть разрыв в объёме менее прочного из соприкасающихся материалов.

Взаимодействие материала подложки с материалом части покрытия при напылении в каждом элементарном участке поверхности можно условно разделить на три последовательные стадии [13]:

- 1) сближение соединяемых веществ (образование физического контакта);
- 2) активация контактных поверхностей и химическое взаимодействие материалов на границе раздела фаз;
- 3) объемное развитие взаимодействия.

При напылении вследствие кратковременности взаимодействия частиц с подложкой 10^{-4} - 10^{-7} сек успевают пройти практически только две первые стадии [14, 15]. Объемное развитие обычно происходит только в процессе эксплуатации покрытий при высоких температурах или в результате специального технологического отжига. В силу этих особенностей процесс образования прочного сцепления частиц чрезвычайно интересен не только с практической точки зрения, но и с точки зрения возможности анализа явлений, которые приводят материалы к прочному сцеплению на второй стадии. По существу, приваривание частиц определяется главным образом тем, насколько полно проходит химическая стадия. Внешним проявлением степени этой стадии является заполнение поверхности контакта «очагами» схватывания методы наблюдения. Стадия физического контакта не лимитирует взаимодействия, поскольку расплавленные частицы быстро растекаются и под большим давлением прижимаются к поверхности подложки. Есть основания считать, что физический контакт образуется за время, на один или два порядка меньшее, чем длительность химической стадии, ведущей к привариванию частиц.

Как показывают расчеты, если прошли две первые стадии, то объемные процессы при напылении успевают пройти главным образом по дислокациям, малоугловым границам зерен и другим дефектам структуры. Диффузия существенно облегчается пластической деформацией [16], имеющей место в зоне контакта при соударении частиц с подложкой. Кроме того, диффузии также способствует высокая температура в контакте.

Особенно легко протекают объемные процессы в напыленном материале, отличающемся пористой, дефектной, неравновесной структурой и сильно искаженной кристаллической решеткой. Это обстоятельство всегда следует учитывать при длительной эксплуатации плазменных покрытий. В процессе работы при повышенной температуре они склонны к усиленной диффузии и образованию новых фаз, особенно в переходной зоне покрытие - подложка. Иногда облегченная диффузия элементов в покрытии используется для создания

на его поверхности защитных пленок обеспечивая непрерывную поставку необходимых компонентов из объема покрытия. Этот принцип, например, используется в силицидных покрытиях на основе MoSi_2 , образующих при окислении на поверхности стекловидную защитную пленку.

Условия формирования покрытия определяют величину адгезии. Адгезия представляет собой одну из главных характеристик покрытия. Для оценки адгезии мы используем температуру в контакте.

1.2 Покрытие специального назначения

В основе современного развития техники напыления газотермических покрытий лежат следующие пути дальнейшего совершенствования как технологии, так и качества получаемых покрытий.

1. Разработка оборудования для различных технологий напыления - газопламенного, детонационного, электродугового, плазменного и других методов.

2. Создание новых материалов для получения покрытий с заданной структурой и служебными свойствами.

3. Совершенствование и развитие технологий напыления - методы активации напыляемой поверхности, сверхзвуковое скоростное напыление, использование экзотермически реагирующих порошков, ультразвуковая обработка формирующегося покрытия и др.

Новые возможности получения покрытий с широким спектром механических, физико-химических свойств открываются при создании функциональных многослойных покрытий. Как показывает обзор современной литературы, подобные работы ведутся в следующих направлениях: создание термобарьерных слоев; нанесение промежуточных слоев для повышения адгезии основного покрытия.

В следующие тексты видно, что покрытие имеет разные специальные назначения.

Функциональные покрытия широко используются в оборудовании для производства энергии в таких отраслях, как возобновляемые источники энергии, нефть и газ, двигатели и газовые турбины. Интеллектуальная термическая обработка распылением является жизненно важной во многих из этих областей для эффективного производства. Усовершенствованные области нанесения покрытий методом термического напыления включают терморегуляцию, износ, окисление, коррозионную стойкость, системы уплотнения, вибрацию и звукопоглощение и ремонт компонентов. В работе [21] рассматривается текущее

состояние материалов, оборудования, обработки и аспектов свойств основных покрытий в энергетической отрасли, особенно разработки крупномасштабных газовых турбин. В дополнение к самым последним промышленным достижениям в технологиях термического напыления также подчеркиваются будущие технические потребности.

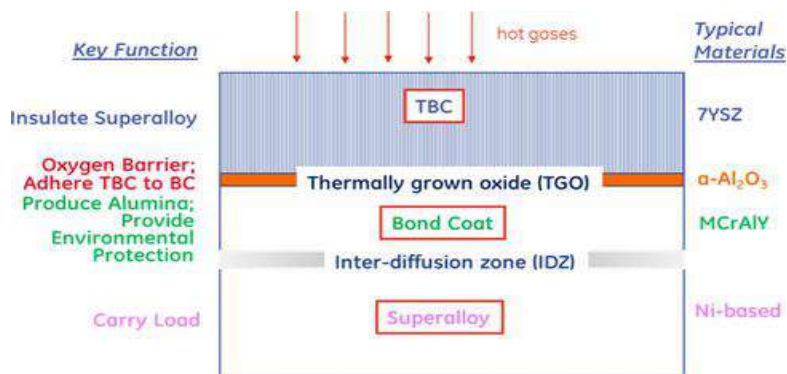


Рисунок 14 - Типичная система покрытия термобарьером, используемая в секциях сгорания и турбины в ИГТ

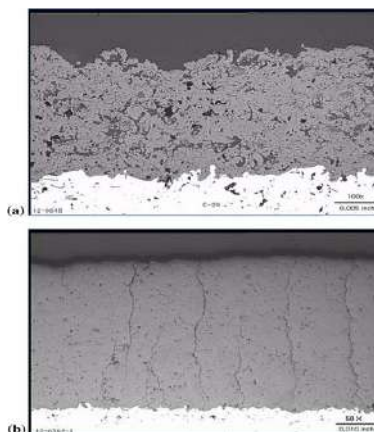
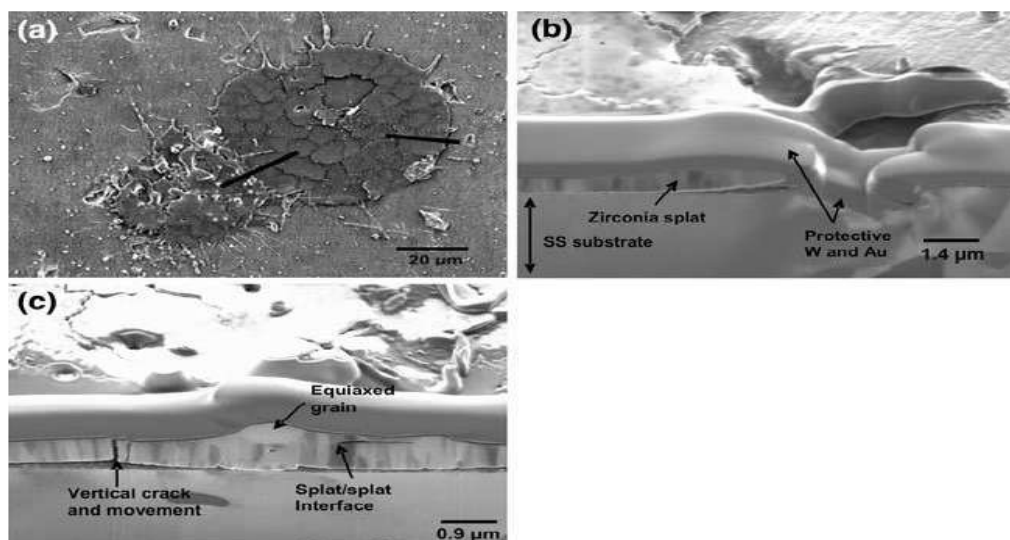


Рисунок 15 - Примеры (а) пористой ТБС и (б) DVC микроструктуры ТБС, используемой для тепловой защиты компонентов из суперсплава

В работе [22] была Изучена морфология атмосферно-плазменного оксида циркония, стабилизированного иттрием. Одиночные брызги распыленного в плазме порошка $ZrO_2-7\% Y_2O_3$ были собраны на полированных подложках из нержавеющей стали, выдерживаемых при трех различных температурах (комнатная температура, 300°C и 600°C). Было оценено влияние нагрева на топографию поверхности. Было изучено влияние параметров процесса распыления, таких как температура подложки, температура частиц и скорость, на морфологию одиночных брызг. Было исследовано изменение формы сплэта в

зависимости от его расположения в зоне действия плазменного спрея. Были проанализированы образование пор и микротрещин, разбрызгивание, границы раздела сплэт / субстрат и сплэт / сплэт. Морфологию и диаметр сплэт, спутниковые частицы и характер разбрызгивания регистрировали с использованием сканирующей электронной микроскопии и анализа изображений. Интерфейсы сплэт / подложка и сплэт / сплэт были изучены по поперечным сечениям, полученным путем фрезерования сфокусированным ионным пучком. Результаты показали, главным образом, морфологию формы диска и отсутствие признаков расслаивания вдоль поверхности раздела сплэт / субстрат при температуре субстрата 600°C. Перекрытые знаки показали признаки таяния (микросварки) на границах. Было измерено, что толщина сплэта составляла менее 1 мкм для всех условий распыления.



рисунки 16 - СЭМ-микрофотографии, полученные с микроскопа FIB, показывающие (а) вид сверху двух планок, (б) поперечное сечение планки на краю, обозначенное на рис. 12 (а) и (с) поперечным сечением перекрытой области, отмеченной на рис. 12 (а)

В работе [23] автор написал о Антикоррозионном покрытии состоит из трех слоев. В работе делали 3 слойные покрытия, у которых есть своя функция.

Первый слой. Основу всего покрытия составляет металлический слой, наносимый при помощи специального оборудования на нижнюю часть абсорбера путем высокоскоростного газотермического напыления. Процесс напыления полностью автоматизирован, т. к., работая, установка по нанесению

покрытия разгоняет напыляемые частицы до сверхзвуковых скоростей (800–900 м/с) и создает высокий уровень шума, вредный для человека. Средняя толщина металлического слоя 0,25 мм. Марка напыляемого металлического порошка X28H10M5C1, сталь с высоким содержанием хрома и никеля обуславливает высокую коррозионную стойкость.

Серьезным недостатком покрытия, нанесенного газотермическим напылением является наличие большого количества сквозных пор 3 (рисунок. 4) с установленной величиной пористости 0,3 %, которая в свою очередь приводит к возникновению коррозии под покрытием 17 (рис. 17). После нанесения металлического покрытия появляется необходимость в закрытии пор, для того чтобы уменьшить вероятность появления подслоной коррозии. С этой целью на металлическое покрытие наносят полимерное покрытие из двух слоев. *Второй слой.* Грунтовка двухкомпонентная на основе ВЛ-02 и кислотного отвердителя; наносится на первый слой и служит подготовительным слоем к третьему покрытию.

Третий слой. Трехкомпонентное полиуретановое покрытие на основе раствора куралона в метилэтилкетоне и полиуретановая композиция; наносится на грунтовку для закрытия пор металлического покрытия. Экспериментальными данными доказано, что после разъедания верхнего слоя полимерного покрытия оно продолжает выполнять свою функцию, оставаясь в порах. Нанесение защитных покрытий позволило понизить скорость коррозии с 2,53 до 0,19 мм/год и выйти на проектную скорость коррозии.

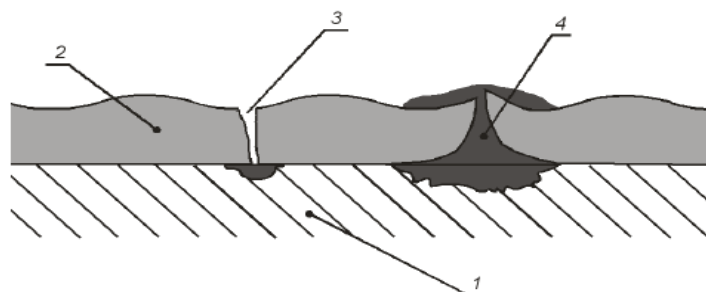


Рисунок 17 - 1 – металл, подложка; 2 – металлическое покрытие; 3 – поры; 4 – зона отслаивания покрытия

В работе [25] обсудили как увеличивать период стойкости инструмента. Значительная часть деталей машин и механизмов изготавливается с применением обработки резанием, причем в себестоимости изделия доля затрат на инструменты может составлять 3-10%. Следовательно, один из путей снижения себестоимости продукции, способствующего увеличению прибыли предприятия, - повышение работоспособности режущего инструмента. Так, увеличение периода стойкости инструмента в два раза при прочих равных условиях может привести к снижению себестоимости продукции до 5%. Проблему повышения стойкости режущих инструментов можно решить, создавая и используя износостойкие тонкопленочные покрытия, обладающие высокой твердостью, энергоемкостью, мелкозернистой структурой с минимальным количеством дефектов и стойкостью к окислению. Такие покрытия состоят из нитридов, карбидов, оксидов, карбонитридов металлов (в основном титана, алюминия и хрома) и имеют толщину 3-12 мкм (рис.1). Начало широкого использования инструментов с покрытиями в машиностроении промышленно развитых стран пришлось на середину 80-х годов, и было обусловлено их высокой эффективностью и удачными технологическими решениями нанесения покрытий.

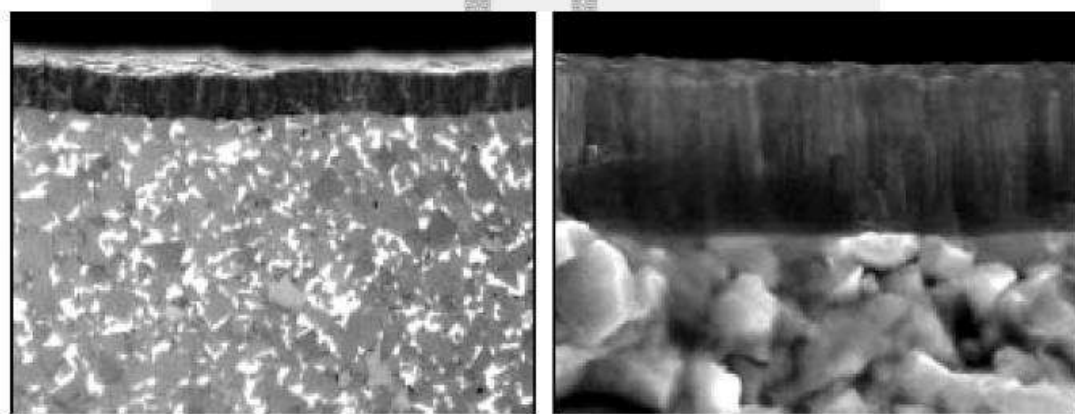


Рисунок 18 - Поперечные сечения твердосплавных режущих пластин с однослойными покрытиями TiAlN (слева) и TiN (справа) толщиной 5 мкм. Обратите внимание на отличие структуры покрытий, имеющих очень мелкие (несколько десятков нанометров) зерна столбчатой структуры (в верхней части пластин), от крупнозернистой твердосплавной основы.

1.3 Частица на подложке и температура в контакте

Условия формирования покрытия определяют величину адгезии. Адгезия представляет собой одну из главных характеристик покрытия. Поэтому, для оценки адгезии надо считать температуру в контакте.

В работе А.П. Алихимова [12] и др. (ИТПМ СО РАН) рассматривается процесс деформации напыляемой частицы на подложке и предлагается метод расчёта температурных условий на границе.

Температуру в контакте "частица - подложка" можно определить как

$$T_c(\xi, \tau) = T_c^0(\xi, \tau) + T_v(\xi, \tau), \quad (5)$$

где T_c^0 - температура в контакте двух различно нагретых тел без учета скорости; T_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):

$$T_c^0(\xi, \tau) = T_c^0 = \frac{T_s + K_p T_p}{1 + K_p}, \quad (6)$$

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

$$K_p = \sqrt{\frac{\lambda_p c_p \rho_p}{\lambda_s c_s \rho_s}}, \quad (7)$$

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.

2 Объект и методы исследования

2.1 Материалы исследования

В качестве модельных материалов при проведении численных расчетов были выбраны следующие материалы для частицы: металлы – Ti, Al, Ni, Cu, Zr, Zn, W и Fe; сплавы – система Ni – Ti и система Ni – Al, и оксидные материалы – TiO, Al₂O₃, NiO, CuO, ZrO₂, ZnO₂ и Fe₂O₃. Для подложки были выбраны - Ст20, металлы, сплавы и оксиды. Теплофизические характеристики материалов (где ρ – плотность, λ - коэффициент теплопроводности, c - коэффициент теплоемкости, $\Delta T_{ад}$ - адиабатическое повышение температуры за счет экзотермической реакции) представлены в таблице 1 - 3.

Таблица 1 - Теплофизические характеристики материалов металлов

Материал	ρ , $кг/м^3$	λ , $Вт/м*К$	c , $Дж/кг*К$
Ti	4260	33	854
Al	2550	217	1256
Ni	8100	78.5	625
Cu	8361	317	525
Zr	6090	31	367
Zn	6920	400	452.7
Fe	7040	35	805.8
W	19260	162	132
Ст20	7850	50.7	690

Таблица 2 - Теплофизические характеристики сплавов

Материал	ρ , $кг/м^3$	λ , $Вт/м*К$	c , $Дж/кг*К$	$\Delta T_{ад}$, $К$
Ni ₇₅ Ti ₂₅ (s)	9225	73.375	465.4	/
Ni ₇₅ Ti ₂₅ (p)	7140	67.125	682.275	1020
Ni ₅₀ Ti ₅₀ (s)	6700	56.4	487.2	/
Ni ₅₀ Ti ₅₀ (p)	6180	55.8	739.6	1000

Ni ₂₅ Ti ₇₅ (s)	5600	39.325	509	/
Ni ₂₅ Ti ₇₅ (p)	5220	44.375	796.825	600
Ni ₇₅ Al ₂₅ (s)	7349	126.8	558.6	/
Ni ₇₅ Al ₂₅ (p)	6713	113.1	782.8	1200
Ni ₅₀ Al ₅₀ (s)	5799	163.2	673.7	/
Ni ₅₀ Al ₅₀ (p)	5325	147.75	940.5	1750
Ni ₂₅ Al ₇₅ (s)	4248	199.6	788.3	/
Ni ₂₅ Al ₇₅ (p)	3937.5	183.4	1098.3	1200

Таблица 3 - Теплофизические характеристики оксидов

Материал	ρ , <i>кг/м³</i>	λ , <i>Вт/м*К</i>	c , <i>Дж/кг*К</i>
TiO	4270	3.3	894
Al ₂ O ₃	3970	7.58	1666
NiO	6670	752.93	6.3
CuO	6100	144.9	1125.486
ZrO ₂	556	2.5	600
ZnO ₂	5560	2.5	600
Fe ₂ O ₃	5242	17.6	487.8

Для сплавов системы Ni – Ti и Ni – Al теплофизические свойства рассчитаны по методу аддитивного приближения, например,

$$\rho_{\text{Ni75Ti25}} = 75\% * \rho_{\text{Ni}} + 25\% * \rho_{\text{Ti}} = 8100 * 0.75 + 4260 * 0.25 = 7140 \text{ кг/м}^3$$

2.2 Условия напыления частиц (температура и скорость)

Исследование температурных условий взаимодействия напыленной частицы с поверхностью подложки проводится для двух видов напыления – газотермическое напыление и холодное газодинамическое напыление.

Расчет контактной температуры на границе частица-подложка проводили для следующих условий: скорость варьировалась в пределах от 100 до 1000 м/с ($v = 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000$ м/с;), температура подложки $T_{\text{п}} = 300\text{K}$.

При холодном газодинамическом напылении температура частицы $T_{\text{ч}}$ равна комнатной температуре 300K, при газотермическом напылении покрытий температура частицы $T_{\text{ч}}$ равна температуре плавления материала частицы.

В качестве материала подложки выбирается сталь 20, как материал исходного напыляемого изделия, и чистые металлы, оксиды, как материал подложки после нанесения первого слоя напыляемого материала (металл, оксид).

2.3 Расчет температуры в контакте с учетом скорости частиц

В работе [12] рассматривается процесс деформации напыляемой частицы на подложке и предлагается метод расчёта температурных условий на границе.

Температуру в контакте "частица - подложка" можно определить, как

$$T_c(\xi, \tau) = T_c^0(\xi, \tau) + T_v(\xi, \tau), \quad (5)$$

где T_c^0 - температура в контакте двух различно нагретых тел без учета скорости; T_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):

$$T_c^0(\xi, \tau) = T_c^0 = \frac{T_s + K_p T_p}{1 + K_p}, \quad (6)$$

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

$$K_p = \sqrt{\frac{\lambda_p c_p \rho_p}{\lambda_s c_s \rho_s}}, \quad (7)$$

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 более точного определения температура в контакте в работе учитывается кинетическая энергия частицы, которая определяется ее скоростью. Согласно уравнению (1), для этого необходимо знать температуру дополнительного подогрева контакта за счет тепла, выделяемого при ударе.

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

$$E_{\text{кин}} = Q, \quad (8)$$

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

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

$$E_{\text{кин}} = \frac{mv^2}{2}, \quad Q = mc\Delta T,$$

где, c – теплоёмкость материала частицы, ΔT – разность температур частицы до удара и после удара.

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

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

Значит,

$$T_p = T_m + \Delta T \quad (9)$$

где, T_p – температуры частицы перед ударом, $T_m + \Delta T$ – температура частицы в момент соударение,

Тогда в соответствии с формулой (7), таким образом, контактную температуру для произвольной скорости частицы можно определить по формуле

$$T_c = \frac{T_s + K_p(T_m + \Delta T)}{1 + K_p} \quad (10)$$

где T_c – температура в контакте, T_m – температура частицы, которую она приобретала в полете до столкновения с подложкой, ΔT – дополнительный подогрев частицы засчёт кинетической энергии.

При напылении экзотермически реагирующих порошков необходимо учитывать нагрев частицы за счёт экзотермической реакции. В этом случае температура частицы

$$T_p = T_m + \Delta T + \Delta T_{ad}$$

(11)

где ΔT_{ad} – адиабатическое повышение температуры за счёт экзотермической реакции

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ
И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ71	Ян Сяо

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	ОМ
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	Материаловедение и технологии материалов

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	<i>Материально-технические ресурсы: материалы для работы (2887,5 руб.), амортизация оборудования (5561,86 руб.). Информационные ресурсы: научные статьи, учебники по теме исследования. Человеческие ресурсы: инженер (магистрант), научный руководитель. ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов». ГОСТ 31532-2012 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность». Ставка страховых взносов 30 % (пункт 2 ст.425 НК РФ)</i>
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Планирование процесса управления НИИ: структура и график проведения, бюджет	<i>НИИ проводится в 11 этапов в течение 18 недель. Общий бюджет затрат НИИ 317903,26 руб. В статьи расходов включены: материальные затраты, амортизация</i>

	<i>оборудования, затраты по основной, доп. заработной плате исполнителей темы, отчисления во внебюджетные фонды, накладные расходы</i>
2. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	<i>Экономическая эффективность обусловлена продлением срока службы компонентов.</i>
Перечень графического материала:	
1. График проведения и бюджет НТИ	
2. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	14.02.2019
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
старший преподаватель	Рагозин Д. В.	к. и. н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ71	Ян Сяо		

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1 Организация и планирование работ

4.1.1 Продолжительность этапов работ

Рабочая группа, сформированная для выполнения научного исследования, состоит из трех человек: руководитель, лаборант, инженер. В таблице 4.1 представлены этапы работ и распределение исполнителей по ним.

Таблица 4.1 - Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Этапы работы	№	Исполнители	Загрузка исполнителей
Постановка целей и задач, получение исходных данных	1	НР	НР – 100%
Составление и утверждение ТЗ	2	НР, И	НР – 100% И – 10%
Подбор и изучение материалов по тематике	3	НР, И	НР – 30% И – 100%
Разработка календарного плана	4	НР, И	НР – 100% И – 10%
Обсуждение литературы	5	НР, И	НР – 30% И – 100%
Выбор структурной схемы устройства	6	НР, И	НР – 100% ИП – 70%
Выбор принципиальной схемы устройства	7	НР, И	НР – 100% И – 80%
Расчет принципиальной схемы устройства	8	И	И – 100%
Оформление расчетно-пояснительной записки	9	И	И – 100%
Оформление графического материала	10	И	И – 100%
Подведение итогов	11	НР, И	НР – 60% И – 100%

Ожидаемое значение продолжительности этапа работы $t_{ож}$ определено по формуле:

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

где t_{min} – минимальная продолжительность работы, дн.;
 t_{max} – максимальная продолжительность работы, дн.;

Ниже представлены расчеты $t_{ожс}$ для каждого этапа работы в днях:

- | | |
|--|--|
| 1) $t_{ожс1} = (3 \cdot 3 + 6 \cdot 5)/5 = 4,2$ | 7) $t_{ожс1} = (4 \cdot 3 + 6 \cdot 5)/5 = 4,8$ |
| 2) $t_{ожс1} = (2 \cdot 3 + 3 \cdot 5)/5 = 2,4$ | 8) $t_{ожс1} = (10 \cdot 3 + 16 \cdot 5)/5 = 12,4$ |
| 3) $t_{ожс1} = (10 \cdot 3 + 13 \cdot 5)/5 = 11,2$ | 9) $t_{ожс1} = (5 \cdot 3 + 8 \cdot 5)/5 = 6,2$ |
| 4) $t_{ожс1} = (3 \cdot 3 + 7 \cdot 5)/5 = 4,6$ | 10) $t_{ожс1} = (4 \cdot 3 + 8 \cdot 5)/5 = 5,6$ |
| 5) $t_{ожс1} = (3 \cdot 3 + 6 \cdot 5)/5 = 4,2$ | 11) $t_{ожс1} = (4 \cdot 3 + 9 \cdot 5)/5 = 6$ |
| 6) $t_{ожс1} = (8 \cdot 3 + 10 \cdot 5)/5 = 8,8$ | |

Продолжительность каждой работы в рабочих днях $T_{РДi}$ определена исходя из ожидаемой продолжительности работ:

$$T_{РД} = \frac{t_{ож}}{K_{ВН}} \cdot K_{Д} = 1,2 * t_{ожi} \quad (4.2)$$

где $T_{РДi}$ – продолжительность одной работы, раб. дн.; $t_{ожi}$ – ожидаемая продолжительность выполнения одной работы, дн.; $K_{ВН}$ – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей, примем $K_{ВН} = 1$; $K_{Д}$ – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ, примем $K_{Д} = 1,1$.

Ниже представлены расчеты $T_{РД}$ по исполнителям для каждого этапа работы с учетом загруженности исполнителя на данном этапе работы, представленной в таблице 4.1:

- | | |
|--|--|
| 1) $T_{РД1}(P) = 1,1 \cdot 4,2 \cdot 1 = 4,62$ | 7) $T_{РД1}(P) = 1,1 \cdot 4,8 \cdot 1 = 5,28$ |
| | $T_{РД1}(И) = 1,1 \cdot 4,8 \cdot 0,8 = 4,22$ |
| 2) $T_{РД1}(P) = 1,1 \cdot 2,4 \cdot 1 = 2,64$ | 8) $T_{РД1}(И) = 1,1 \cdot 12,4 \cdot 1 = 13,64$ |
| $T_{РД1}(И) = 1,1 \cdot 2,4 \cdot 0,1 = 0,26$ | |
| 3) $T_{РД1}(P) = 1,1 \cdot 11,2 \cdot 0,3 = 3,7$ | 9) $T_{РД1}(И) = 1,1 \cdot 6,2 \cdot 1 = 6,82$ |
| $T_{РД1}(И) = 1,1 \cdot 11,2 \cdot 1 = 12,32$ | |
| 4) $T_{РД1}(P) = 1,1 \cdot 4,6 \cdot 1 = 5,06$ | 10) $T_{РД1}(И) = 1,1 \cdot 5,6 \cdot 1 = 6,16$ |
| $T_{РД1}(И) = 1,1 \cdot 4,6 \cdot 0,1 = 0,51$ | |
| 5) $T_{РД1}(P) = 1,1 \cdot 4,2 \cdot 0,3 = 1,39$ | 11) $T_{РД1}(P) = 1,1 \cdot 6 \cdot 0,6 = 3,96$ |
| $T_{РД1}(И) = 1,1 \cdot 4,2 \cdot 1 = 4,62$ | $T_{РД1}(И) = 1,1 \cdot 6 \cdot 1 = 6,6$ |
| 6) $T_{РД1}(P) = 1,1 \cdot 8,8 \cdot 1 = 9,68$ | |
| $T_{РД1}(И) = 1,1 \cdot 8,8 \cdot 0,7 = 6,78$ | |

Длительность каждого из этапов работ из рабочих дней переведена в календарные дни по формуле:

$$T_{КДi} = T_{РДi} \cdot T_K, \quad (4.3)$$

где $T_{КДi}$ – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях; $T_{РДi}$ – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях; T_K – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по формуле:

$$T_K = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ВД} - T_{ПД}} = \frac{365}{365 - 52 - 10} = 1,205, \quad (4.4)$$

где $T_{КАЛ}$ – количество календарных дней в году (365); $T_{ВД}$ – количество выходных дней в году (52); $T_{ПД}$ – количество праздничных дней в году (10).

Ниже представлены расчеты $T_{КД}$ по исполнителям для каждого этапа работы:

- | | |
|--|--|
| 1) $T_{КД1}(Р) = 4,62 \cdot 1,205 = 5,57$ | 7) $T_{КД1}(Р) = 5,28 \cdot 1,205 = 6,36$
$T_{КД1}(И) = 4,22 \cdot 1,205 = 5,09$ |
| 2) $T_{КД1}(Р) = 2,64 \cdot 1,205 = 3,18$
$T_{КД1}(И) = 0,26 \cdot 1,205 = 0,32$ | 8) $T_{КД1}(И) = 13,64 \cdot 1,205 = 16,44$ |
| 3) $T_{КД1}(Р) = 3,7 \cdot 1,205 = 4,45$
$T_{КД1}(И) = 12,32 \cdot 1,205 = 14,85$ | 9) $T_{КД1}(И) = 6,82 \cdot 1,205 = 8,22$ |
| 4) $T_{КД1}(Р) = 5,06 \cdot 1,205 = 6,1$
$T_{КД1}(И) = 0,51 \cdot 1,205 = 0,61$ | 10) $T_{КД1}(И) = 6,16 \cdot 1,205 = 7,42$ |
| 5) $T_{КД1}(Р) = 1,39 \cdot 1,205 = 1,67$
$T_{КД1}(И) = 4,62 \cdot 1,205 = 5,57$ | 11) $T_{КД1}(Р) = 3,96 \cdot 1,205 = 6,60$
$T_{КД1}(И) = 4,77 \cdot 1,205 = 7,95$ |
| 6) $T_{КД1}(Р) = 9,68 \cdot 1,205 = 11,66$
$T_{КД1}(И) = 6,78 \cdot 1,205 = 8,17$ | |

В таблице 4.2 представлены результаты определения продолжительности этапов работ и их трудоемкости по исполнителям, занятым на каждом этапе, в соответствии с данными таблицы 4.1. В таблице 4.3 представлен линейный график выполнения работ.

.

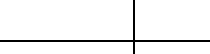
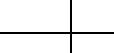
Таблица 4.2

Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.- дн.			
					Трд		Ткд	
		t_{min}	t_{max}	$t_{ож}$	НР	И	НР	И
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Постановка задачи	НР	3	6	4.2	4.62	-	5.57	-
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	НР, И	2	3	2.4	2.64	0.26	3.18	0.32
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	10	13	11.2	3.70	12.32	4.45	14.85
Разработка календарного плана	НР, И	3	7	4.6	5.06	0.51	6.10	0.61
Обсуждение литературы	НР, И	3	6	4.2	1.39	4.62	1.67	5.57
Выбор структурной схемы устройства	НР, И	8	10	8.8	9.68	6.78	11.66	8.17
Выбор принципиальной схемы устройства	НР, И	4	6	4.8	5.28	4.22	6.36	5.09
Расчет принципиальной схемы устройства	И	10	16	12.4	-	13.64	-	16.44
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	5	8	6.2	-	6.82	-	8.22
Оформление графического материала	И	4	8	5.6	-	6.16	-	7.42
Подведение итогов	НР, И	4	9	6	3.96	6.60	4.77	7.95
Итого:				70.4	36.32	61.93	43.77	74.63

Таблица 4.3

Линейный график работ

Этап	НР	И	Март			Апрель			Май			Июнь	
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
1	5.57	-											
2	3.18	32	 										
3	4.45	.85											
4	6.10	61											
5	1.67	57											
6	11.66	17											
7	6.36	09											
8	-	.44											
9	-	22											
10	-	42											
11	4.77	95										 	

НР – ; И – 

4.1.2 Расчет накопления готовности проекта

Степень готовности проекта на данном этапе определяется формуле:

$$CG_i = \frac{TP_i^H}{TP_{общ}} = \frac{\sum_{i=1}^i TP_i}{\sum_{i=1}^I TP_i} = \frac{\sum_{i=1}^i \sum_{j=1}^j TP_{ij}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^j TP_{ij}}, \quad (4.5)$$

где CG_i – степень готовности проекта на i -ом этапе; TP_i^H – накопленная трудоемкость проекта к i -ому этапу; $TP_{общ}$ – общая трудоемкость проекта (таблица 4.2, сумма строки «итого» колонки $T_{КД}$: $TP_{общ} = 43,77 + 73,63 = 117,4$); TP_i – общая (по всем исполнителям) трудоемкость i -ого этапа проекта; TP_{ij} – трудоемкость j -ого исполнителя на i -ом этапе проекта (таблица 5.2, колонка $T_{КД}$); I – общее количество этапов проекта.

Ниже представлены расчеты удельного веса каждого этапа работы по трудоемкости TP и степень готовности работы на данном этапе CG :

- | | | | |
|----|---|-----|---|
| 1) | $TP_1 = \frac{5,57}{117,4} \cdot 100 \% = 4,7 \%$ | 7) | $TP_7 = \frac{6,36 + 5,09}{117,4} \cdot 100 \% = 9,75\%$ |
| | $CG_1 = 4,7 \%$ | | $CG_7 = 55,75 + 9,75 = 65,5 \%$ |
| 2) | $TP_2 = \frac{3,18 + 0,32}{117,4} \cdot 100 \% = 2,98 \%$ | 8) | $TP_8 = \frac{16,44}{117,4} \cdot 100 \% = 7,6\%$ |
| | $CG_2 = 4,7 + 2,98 = 7,68 \%$ | | $CG_8 = 65,5 + 7,6 = 73,1 \%$ |
| 3) | $TP_3 = \frac{4,45 + 14,85}{117,4} \cdot 100 \% = 19,3\%$ | 9) | $TP_9 = \frac{8,22}{117,4} \cdot 100 \% = 7 \%$ |
| | $CG_3 = 7,68 + 19,3 = 26,98 \%$ | | $CG_9 = 73,1 + 7 = 80,1 \%$ |
| 4) | $TP_4 = \frac{6,1 + 0,61}{117,4} \cdot 100 \% = 5,71 \%$ | 10) | $TP_{10} = \frac{7,42}{117,4} \cdot 100 \% = 6,32 \%$ |
| | $CG_4 = 26,98 + 5,71 = 32,69 \%$ | | $CG_{10} = 80,1 + 6,32 = 86,42 \%$ |
| 5) | $TP_5 = \frac{1,67 + 5,57}{117,4} \cdot 100 \% = 6,17 \%$ | 11) | $TP_{11} = \frac{4,77 + 7,95}{117,4} \cdot 100 \% = 13,58 \%$ |
| | $CG_5 = 32,69 + 6,17 = 38,86 \%$ | | $CG_{11} = 86,42 + 13,58 = 100 \%$ |
| 6) | $TP_6 = \frac{11,66 + 8,17}{117,4} \cdot 100 \% = 16,89 \%$ | | |
| | $CG_6 = 38,86 + 16,89 = 55,75 \%$ | | |

Применительно к таблице (4.2) величины TP_{ij} (TP_{kj}) находятся в столбцах (6, $j = 1$) и (7, $j = 2$). $TP_{общ}$ равна сумме чисел из итоговых клеток этих столбцов. Расчет TP_i (%) и CG_i (%) на основе этих данных содержится в таблице (4.4).

Таблица 4.4 – Нарастание технической готовности работы и удельный вес каждого этапа (№ работы по таблице 4.1)

№ работы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ТР, %	4,7	2,98	19,3	5,71	6,17	16,89	9,75	7,6	7	6,32	10,83
СГ, %	4,7	7,68	26,95	32,69	38,86	55,75	65,5	73,1	80,1	86,42	100

4.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта

4.2.1 Расчет затрат на материалы

Таблица 4.5 - Расчет затрат на материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Бумага для принтера формата А4	2	200 л.	400
Картридж для принтера	1550	1 шт.	1550
Флэшка 8гб	800	1 шт.	800
Итого:			2750

Допустим, что ТЗР составляют 5 % от отпускной цены материалов, тогда расходы на материалы с учетом ТЗР равны $C_{\text{мат}} = 2750 * 1,05 = 2887,5$ руб.

4.2.2 Расчет заработной платы

Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и инженера, а также премии, входящие в фонд заработной платы. Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя. Величины месячных окладов (МО) для сотрудников ТПУ можно получить на его портале. Оклад инженера принимается равным окладу соответствующего специалиста низшей квалификации в организации, где исполнитель проходил преддипломную практику.

Среднедневная тарифная заработная плата ($ЗП_{\text{дн-т}}$) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{дн-т}} = \text{МО} / 25,083 \quad (4.6)$$

учитывающей, что в году 301 рабочий день и, следовательно, в месяце в среднем 25,083 рабочих дня (при шестидневной рабочей неделе).

Расчет затрат на полную заработную плату приведены в таблице 4.6. Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с округлением до целого взяты

из таблицы 4.2. Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используется следующий ряд коэффициентов: $K_{ПР} = 1,1$; $K_{доп.ЗП} = 1,188$; $K_p = 1,3$. Таким образом, для перехода от тарифной (базовой) суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку (зарплатной части сметы) необходимо первую умножить на интегральный коэффициент $K_{и} = 1,1 * 1,188 * 1,3 = 1,699$. Вышеуказанное значение $K_{доп.ЗП}$ применяется при шестидневной рабочей неделе, при пятидневной оно равно 1,113, соответственно в этом случае $K_{и} = 1,62$.

Ниже представлены расчеты заработной платы $C_{зп}$ и средневенной заработной платы для каждого участника проекта в рублях:

$$C_{зп}(P) = \frac{33664}{25,083} * 37 * 1699 = 84367,8$$

$$C_{зп}(И) = \frac{15470}{25,083} * 62 * 1,62 = 61946,37$$

Результаты расчетов занесены в таблицу 4.6.

Таблица 4.6 – Затраты на заработную плату

Исполните.	Оклад, руб./мес.	Средневенная ставка, руб./раб.день	Затраты времени, раб.дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	33 664	1342,09	37	1,699	84367.80
И	15 470	616,75	62	1,62	61946,37
Итого:					146314,17

4.2.3 Расчет затрат на социальный налог

Затраты на единый социальный налог (ЕСН), включающий в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляют 30 % от полной заработной платы по проекту, т.е. $C_{соц.} = C_{зп} * 0,3$. Итак, в нашем случае.

$$C_{соц.} = C_{зп} * 0,3 = 146314,17 * 0,3 = 43894,25 \text{ руб.}$$

4.2.4 Расчет затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию, потраченную в ходе выполнения проекта на работу используемого оборудования, рассчитываемые по формуле:

$$C_{\text{эл.об.}} = P_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot \text{Ц}_\text{Э} \quad (4.7)$$

где $P_{\text{об}}$ – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$\text{Ц}_\text{Э}$ – тариф на 1 кВт·час;

$t_{\text{об}}$ – время работы оборудования, час.

Для ТПУ $\text{Ц}_\text{Э} = 5,748$ руб./кВт·час (с НДС).

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 4.2 для инженера ($T_{\text{рд}}$) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов.

$$t_{\text{об}} = T_{\text{рд}} \cdot K_t, \quad (4.8)$$

где $K_t \leq 1$ – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к $T_{\text{рд}}$, определяется исполнителем самостоятельно. В ряде случаев возможно определение $t_{\text{об}}$ путем прямого учета, особенно при ограниченном использовании соответствующего оборудования.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{об}} = P_{\text{ном.}} \cdot K_c \quad (4.9)$$

где $P_{\text{ном.}}$ – номинальная мощность оборудования, кВт;

$K_c \leq 1$ – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности. Для технологического оборудования малой мощности $K_c = 1$.

Ниже представлены расчеты затрат на электроэнергию $C_{\text{эл.эн.}}$, потребляемую используемым оборудованием, в рублях (номер оборудования в соответствии с таблицей 4.7):

$$1) \quad C_{\text{эл.эн.1}} = 302,4 \cdot 0,3 \cdot 5,748 = 521,46 \quad 2) \quad C_{\text{эл.эн.2}} = 30 \cdot 0,1 \cdot 5,748 = 17,24$$

Пример расчета затраты на электроэнергию для технологических целей приведен в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Затраты на электроэнергию технологическую

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{\text{об}}$, час	Потребляемая мощность $P_{\text{об}}$, кВт	Затраты $\text{Э}_{\text{об}}$, руб.
------------------------------	---	---	--

Персональный компьютер	504*0,6	0,3	521,46
Струйный принтер	30	0,1	17,24
Итого:			538,70

4.2.5 Расчет амортизационных расходов

В статье «Амортизационные отчисления» рассчитывается амортизация используемого оборудования за время выполнения проекта.

Используется формула

$$C_{AM} = \frac{H_A * C_{OB} * t_{pf} * n}{F_D}, \quad (4.10)$$

где H_A – годовая норма амортизации единицы оборудования;

C_{OB} – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР. При невозможности получить соответствующие данные из бухгалтерии она может быть заменена действующей ценой, содержащейся в ценниках, прейскурантах и т. п.;

F_D – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берется из специальных справочников или фактического режима его использования в текущем календарном году. При этом второй вариант позволяет получить более объективную оценку C_{AM} . Например, для ПК в 2015 г. (298 рабочих дней при шестидневной рабочей неделе) можно принять $F_D = 298 * 8 = 2384$ часа;

t_{pf} – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта, учитывается исполнителем проекта;

n – число задействованных однотипных единиц оборудования.

При использовании нескольких типов оборудования расчет по формуле делается соответствующее число раз, затем результаты суммируются.

Для определения H_A следует обратиться к приложению 1, содержащему фрагменты из постановления правительства РФ «О классификации основных средств, включенных в амортизационные группы». Оно позволяет получить рамочные значения сроков амортизации (полезного использования) оборудования $\equiv C_A$. Например, для ПК это $2 \div 3$ года. Необходимо задать конкретное значение C_A из указанного интервала, например, 2,5 года. Далее определяется H_A как величина обратная C_A , в данном случае это $1 : 2,5 = 0,4$.

Ниже представлены расчеты амортизации использованного в проекте оборудования на время проекта в рублях (номер оборудования в соответствии с таблицей 4.7):

$$1) \quad C_{AM1} = \frac{0,4 * 65000 * 504}{2408} = 5441,86 \quad 2) \quad C_{AM2} = \frac{0,5 * 4000 * 3}{500} = 120$$

Таблица 4.8 – Расчет амортизации оборудования на время проекта

№	Наименование оборудования	Ц _{об} , тыс. руб.	Н _А	t _{об} , час	F _д , час	C _{ам} , руб.
1	Персональный компьютер	65000	0,4	504	2408	5441,86
2	принтер	4000	0,5	3	500	120
Итого:						5561,86

4.2.6 Расчет расходов, учитываемых непосредственно на основе платежных (расчетных) документов (кроме суточных)

Оплата услуг связи – 1500 руб. Итого по данному пункту C_{нр}=1500 руб.

4.2.7 Расчет прочих расходов

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на выполнение проекта, которые не учтены в предыдущих статьях, их следует принять равными 10% от суммы всех предыдущих расходов, т. е.

$$C_{\text{проч.}} = (C_{\text{мат}} + C_{\text{зп}} + C_{\text{соц}} + C_{\text{эл.об.}} + C_{\text{ам}} + C_{\text{нп}}) \cdot 0,1$$

Для нашего примера это

$$C_{\text{проч.}} = (2887,5 + 146314,17 + 43894,25 + 538,7 + 5561,86 + 1500) \cdot 0,1 = 20069.65 \text{ руб.}$$

4.2.8 Расчет общей себестоимости разработки

Таблица 4.8 - Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	C _{мат}	2887,5
Основная заработная плата	C _{зп}	146314,17

Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{соц}}$	43894,25
Расходы на электроэнергию	$C_{\text{эл.}}$	538,7
Амортизационные отчисления	$C_{\text{ам}}$	5561,86
Непосредственно учитываемые расходы	$C_{\text{нр}}$	1500
Прочие расходы	$C_{\text{проч}}$	20069,65
Итого:		220766,15

Таким образом, затраты на разработку составили $C = 220766,15$ руб.

4.2.9 Расчет прибыли

Если исполнитель работы не располагает данными для применения «сложных» методов, то прибыль следует принять в размере $5 \div 20 \%$ от полной себестоимости проекта. В нашем примере она составляет **44153,23 руб.** (20 %) от расходов на разработку проекта.

4.2.10 Расчет НДС

НДС составляет 20% от суммы затрат на разработку и прибыли. В нашем случае это $(220766,15 + 44153,23) * 0,2 = 264919,38 * 0,2 = 52983,88$ руб.

4.2.11 Цена разработки НИР

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС, в нашем случае $C_{\text{НИР(КР)}} = 220766,15 + 44153,23 + 52983,88 = 317903,26$ руб.

4.3 Оценка экономической эффективности проекта

Экономическая эффективность рассматриваемого проекта обусловлена обеспечением использования существующих в настоящее время оборудования, материалов и технологий газотермического напыления стало возможным значительно снизить или исключить влияние на изнашивание деталей таких факторов, как эрозия, коррозия (в том числе высокотемпературная), кавитация и др.

С научной точки зрения, скорость частиц, температура частиц, температура подложки виды порошка и методы вместе с характеристиками материалов частиц являются основными параметрами, влияющими на формирование покрытия. Но скорость частиц и температура частиц играют более важную роль в формировании покрытия.

Оптимизация технологии напыления также важна, так как высокая температура частиц будет принести последствия в том, что порошки могут окисляться, а получить высокие скорости частиц не реально.

Фактически, есть один недостаток для текущего исследования. При ГТН, покрытие и распыленные частицы более или менее окисляются, потому что они не находятся в среде с вакуумом или инертным газом. При фактической обработке подложки должны подвергаться предварительной обработке перед обработкой, такой как измельчение, кислотное травление и т. д. для удаления поверхностной оксидной пленки. Несмотря на это, феномен окисления нельзя полностью избежать. Поэтому в этом отчете мы изучили контактную температуру и коэффициент K после контакта трех разных типов распыленных частиц с подложкой. До этого мы не знали, как коэффициент K влияет на конечную температуру контакта, и мы также проанализируем его в этом отчете. Три вида частиц и подложки - металл на Ст20, металл на металл и металл на окись.

Однако количественная оценка экономической эффективности затруднена в силу случайного характера рассматриваемого процесса повреждения покрытий.