

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

Инженерная школа новых производственных технологий

Отделение материаловедения

Направление подготовки: 24.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Плазменная сфероидизация металлических порошков для аддитивных технологий

УДК 621.762:621.791.92-023.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ6Д	Дудихин Дмитрий Витальевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. Кафедрой МЧМ	Сапрыкин А.А.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Петухов О.Н.	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Радненков Т.А.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры МТМ	Мартюшев Н.В.	к.т.н., доцент		

Томск – 2018 г.

Планируемые результаты обучения по ООП 22.04.01

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

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

Инженерная школа новых производственных технологий

Отделение материаловедения

Направление подготовки: 24.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

_____ Мартюшев Н.В.
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ6Д	Дудихин Дмитрий Витальевич

Тема работы:

Плазменная сфероидизация металлических порошков для аддитивных технологий	
Утверждена приказом директора ИШ НПТ	Приказ № _____ от _____

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(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.).

Плазменная сфероидизация металлических порошков для аддитивных технологий.
Стандартные металлические порошки марок ПМС-1, НБП-2 и порошки системы Ti-Nb.
Электродуговой плазмотрон постоянного тока с секционированной межэлектродной вставкой марки «ПНК-50».

<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, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Задачи работы:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Проведение опытов по сфероидизации стандартных металлических порошков; • Получение микрофотографий порошков; • Дисперсный анализ исследуемых порошков; • Химический анализ исходных порошков и порошков после обработки плазмой.
--	---

<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Демонстрационный материал (презентация в MS Power Point).</p>
--	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>О.Н. Петухов, доцент ОСГН ШБИП, ТПУ</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Т.А. Радненков, ассистент, ТПУ</p>
<p>Иностранный язык</p>	<p>Ю.П. Ажель, старший преподаватель ОИЯ ИЯФТ, ТПУ</p>

Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:
 Разделы на русском языке: 1 Обзор литературы;
 Разделы на английском языке: 1 Review literature.

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	
--	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Зав. Кафедрой МЧМ</p>	<p>Сапрыкин А.А.</p>	<p>к.т.н.</p>		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>4БМ6Д</p>	<p>Дудихин Дмитрий Витальевич</p>		

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

Инженерная школа новых производственных технологий
Направление подготовки: 24.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»
Уровень образования: магистратура
Отделение материаловедения
Период выполнения (осенний / весенний семестр 2017/2018 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)
10.2016	1. Обзор литературы	20
06.2017	2. Экспериментальная часть	20
09.2017	3. Обсуждение результатов и оформление работ	20
05.2018	4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
05.2018	5. Социальная ответственность	15
06.2018	6. Обязательное приложение на английском языке	15

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. Кафедрой МЧМ	Сапрыкин А.А.	к.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры МТМ	Мартюшев Н.В.	к.т.н., доцент		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 145 страниц, 48 рисунков, 32 таблицы, 128 источник, 3 приложения.

Ключевые слова: плазменная сфероидизация, металлический порошок, аддитивные технологии, сферические частицы, атомизация.

Объектом исследования являются стандартные металлические порошки сфероидизированные посредством плазменной обработки.

Цель работы разработка методики сфероидизации металлических порошков плазмой для аддитивных технологий.

В процессе исследования проводились эксперименты по сфероидизации металлических порошков, ПМС-1, НБП-2 и порошков системы Ti-Nb, потоком плазмы, на электродуговом плазмотроне постоянного тока «ПНК-50»; проведен анализ формы исходных металлических порошков и порошков после обработки плазмой, при помощи растрового электронного микроскопа QUANTA 200 3D; произведен дисперсионный анализ исследуемых порошков; был проведен химический анализ исходных металлических порошков и порошков сфероидизированных плазмой.

В результате исследования были получены металлические порошки со сферической формой частиц; построены графики дисперсного состава порошка; составлены таблицы с результатами по химическому анализу исследуемых порошков; предложена альтернативная методика сфероидизации стандартных металлических порошков для аддитивных технологий.

Область применения: предложенный метод сфероидизации металлических порошков может применяться в производстве расходного сырья, для аддитивных технологий.

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ 12.1.003-83 Шум.
2. ГОСТ ИСО 10816-1-97. Вибрация.
3. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
4. ГОСТ 12.1.005-88 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
5. ГОСТ 12.4.123-83 ССБТ. Средства коллективной защиты от инфракрасных излучений.
6. ГОСТ Р 51070-97 Измерители напряженности электрического и магнитного полей.
7. ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность.
8. ГОСТ 17.2.3.02-78 Атмосфера.
9. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность.
10. ГОСТ 12.1.010-76 ССБТ. Взрывобезопасность.
11. ГОСТ. 12.3.039-85 Плазменная обработка металлов.
12. ПОТ РО 14000-001-98 Правила по охране труда на предприятиях и в организациях машиностроения.

Оглавление

Введение	10
1 Обзор литературы	13
2 Объект и методы исследования	31
3 Расчеты и аналитика	36
3.1 Особенности метода плазменной обработки	36
3.2 ПНК-50, основные характеристики и принцип работы	39
3.3 Узел кольцевого ввода порошка	41
3.4 Плазменная сфероидизация металлических порошков	43
3.5 Изучение структуры и химического состава порошка	44
3.6 Определение дисперсного состава порошка	47
3.7 Методы определения дисперсного состава порошков	48
3.8 Дисперсный анализ порошков	48
3.9 Построение функции распределения	49
4 Результаты проведенного исследования	67
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	77
5.1 Планирование управления научно-техническим проектом	77
5.2 Бюджет научного исследования	83
6 Социальная ответственность	93
6.1 Описание рабочего места	93
6.2 Анализ выявленных вредных факторов производственной среды	94
6.3 Анализ выявленных опасных факторов производственной среды	98
6.4 Охрана окружающей среды	100
6.5 Защита в чрезвычайных ситуациях	102
6.6 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	104
Заключение (выводы)	107
Список публикаций студента	109

Список использованных источников	111
Приложение А Раздел на английском языке	125
Приложение Б Задание для раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	142
Приложение В Задание для раздела «Социальная ответственность»	143

Введение

Аддитивные технологии с полным основанием относят к технологиям двадцать первого века. Они имеют огромный потенциал в снижении энергетических затрат на создание самых разнообразных видов продукции. Степень их использования в промышленном производстве является верным индикатором индустриального и инновационного развития государства [1, 2].

На данном этапе одними из ведущих методов трехмерной печати, являются аддитивные технологии. В России конструируют машины, которые используют лазер, для печати готовых деталей. Они пригодны не только для производства полимерных изделий, но и для печати изделий металлами, что является одним из приоритетных направлений в данной отрасли промышленности [3, 4].

Для печати качественных изделий из металла и полноценной работы конструируемых установок необходим расходный материал – металлический порошок, со сферической формой частиц [5].

В настоящее время российские потребители зависимы от поставок импортных высококачественных металлических порошков, что существенно влияет на цену конечного изделия. Исходя из изложенной проблемы следует, что необходима разработка собственного метода производства специализированных металлических порошков со сферической формой частиц. Благодаря чему было принято решение применить плазменную обработку, которая позволит производить сфероидизацию не только легкоплавких, но и тугоплавких стандартных металлических порошков.

Состояние исследований в России находится на начальном этапе:

1. АО «ГИРЕДМЕТ» – получение околосферической формы порошков титана 10–50 мкм 40 % от масс (лабораторная установка, плазма в качестве доводки формы) – исследования;

2. АО «ВНИИХТ» – получение порошков из нержавеющей стали 70–100 мкм (лабораторная установка, распыление проволоки и обработка порошка) – исследования;

3. ООО «НОРМИН» – производство порошков титановых сплавов плазменной атомизацией 50–70 мкм 35 % от масс (опытная установка) – исследования;

4. УрФУ – получение металлических порошков распылением проволоки из серебра, меди и титана (лабораторная установки) – исследования;

5. ПНИПУ – распыление проволоки плазмой, из титана (лабораторная установка) – исследования;

6. ИТПМ СО РАН – распыление проволоки плазмой, из титана (лабораторная установка) – исследования;

Целью данной работы является разработка методики сфероидизации металлических порошков плазмой для аддитивных технологий.

Объектом исследования являются стандартные металлические порошки сфероидизированные посредством плазменной обработки.

Предметом исследования является получение и применение сфероидизированных металлических порошков для производства изделий аддитивными лазерными технологиями.

Научная новизна заключается в том, что плазменная обработка позволяет сфероидизировать не только легкоплавкие, но и тугоплавкие металлы, с заданной размерностью.

Разработанная методика позволит производить металлические порошки со сферической формой частиц не только из легкоплавких, но и из тугоплавких металлов, таким образом внедрение подобной, универсальной технологии позволит заменить иностранного производителя на российском рынке специализированных металлических порошков для аддитивных технологий.

По результатам экспериментов была представлена методика оптимизации формы металлического порошка, для аддитивных технологий, при помощи плазменной обработки.

Результаты исследований были представлены на нескольких научных конференциях и конкурсах проектов, в качестве докладов:

1. IV Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы машиностроения», 29 марта 2017 года, с докладом «Применение плазменной обработки для сфероидизации металлических порошков», Новосибирск;

2. Отчет с докладом о проделанной работе в финале всероссийского стартап-акселератора «GenerationS», январь 2017 года, Красноярск;

3. VIII Всероссийской научно-практической конференции для студентов и учащейся молодежи «Прогрессивные технологии экономика в машиностроении», 6–8 апреля 2017 года, с пленарным докладом «Применение плазменной обработки для производства специализированных металлических порошков», Юрга;

4. Отчет с докладом о проделанной работе по программе «УМНИК», в мае 2017 года, по заявленному проекту «Исследование процесса оптимизации формы металлического порошка при помощи плазменной обработки для аддитивных технологий», Кемерово.

Хочется особо поблагодарить Кузьмина Виктора Ивановича, сотрудника ИТПМ СО РАН, за неоценимую помощь в проведении экспериментов по плазменной сфероидизации порошков и предоставление установки «ПНК-50». Автор работы выражает свою благодарность сотруднице ИФПМ СО РАН, Химич Маргарите Андреевне, за помощь в получении результатов анализа порошка системы Ti-Nb.

1 Обзор литературы

В настоящее время в России многие исследовательские институты занялись решением задач по производству деталей при помощи аддитивных технологий. Такой метод производства изделий значительно сокращает время, снижает количество затрачиваемого материала, тем самым снижая общую стоимость на изготовление сложнопрофильных деталей. Аддитивные технологии имеют огромное преимущество, в виде гибкости производственного процесса. К примеру, нам необходимо изменить номинальные размеры изделия, в сторону увеличения или уменьшения габаритов. При классическом методе изготовления изделий, придется практически полностью изменить технологический процесс, а аддитивные технологии позволят решить данную проблему лишь изменив размеры модели в управляющей системе, задав необходимые параметры [6–10].

Аддитивные технологии представляют собой очень сложный процесс, который проходит в несколько этапов. Предварительно нам необходимо определиться, какими технологическими параметрами и свойствами должен обладать конечный продукт. Исходя из этих данных готовят сплав подходящего состава, из которого затем производят металлический порошок. Затем проводят подготовительные операции над полученным порошком, для того чтобы обеспечить качественный процесс построения изделия. Следующим этапом происходит послойное нанесение металлического порошка и спекание его частиц между собой, по заданной траектории, в среде заполненной инертным газом. Таким образом на выходе мы получаем полноценное изделие, готовое к дальнейшему применению [11–15].



Рисунок 1 – Этапы аддитивного производства

Проведя исследования в области аддитивного производства, ученые стали разрабатывать различные методики, которые смогли бы учесть все необходимые факторы получения готового изделия из металла, с заданными свойствами. Одними из самых эффективных технологий, такого рода, являются аддитивные лазерные технологии. Здесь можно выделить наиболее эффективную и активно развивающуюся, технологию селективного лазерного сплавления [16–21].

Процесс построения изделия проходит в герметичной камере, которую предварительно заполняют инертным газом. Затем на рабочую платформу наносят тонкий слой металлического порошка, который ровняют ножом, либо роликом, в зависимости от конструкции установки. После чего металлические частицы спекаются между собой лазером по траектории заданной компьютером. Далее рабочий стол опускается на заданную высоту, наносится следующий слой порошка и цикл повторяется до полного построения изделия [22–24].

Не смотря на сложность оборудования, для изготовления изделий аддитивными лазерными технологиями, установки достаточно просты в использовании, а соответственно очень эффективны на производстве.

Российскими инженерами уже конструируются установки подобного рода. Но для полноценной работы таких установок необходим

специализированный металлический порошок, производство которого, в России отсутствует, либо не удовлетворяет требованиям, для его использования. Благодаря чему расходный материал, для трехмерной печати приобретается у иностранных производителей. В свою очередь закупка иностранного порошка обходится очень дорого, что существенно влияет на конечную стоимость готового изделия [25–28].

Высокая цена обусловлена особыми требованиями, предъявляемыми к форме металлических частиц порошка, которая должна быть сферической. Сферические частицы металлического порошка хорошо наносятся в виде рабочего слоя, компактно укладываются в заданный объем и облегчают работу лазера по спеканию частиц между собой [29–31].

Специализированный металлический порошок производят несколькими классическими методами, такими как газовая, вакуумная и центробежная атомизация. Атомизацию проводят на специальных установках – атомайзерах.

Процесс газовой атомизации проводят на специализированной установке, где металл расплавляют в плавильной камере, которую заполняют инертным газом. После того как металл полностью расплавился, его под высоким давлением сливают через распылитель. При распылении, происходит разрушение потока жидкого металла струей инертного газа. Во время фазы полета, частицы металла, под действием сил поверхностного натяжения, приобретают сферическую форму [32–36].

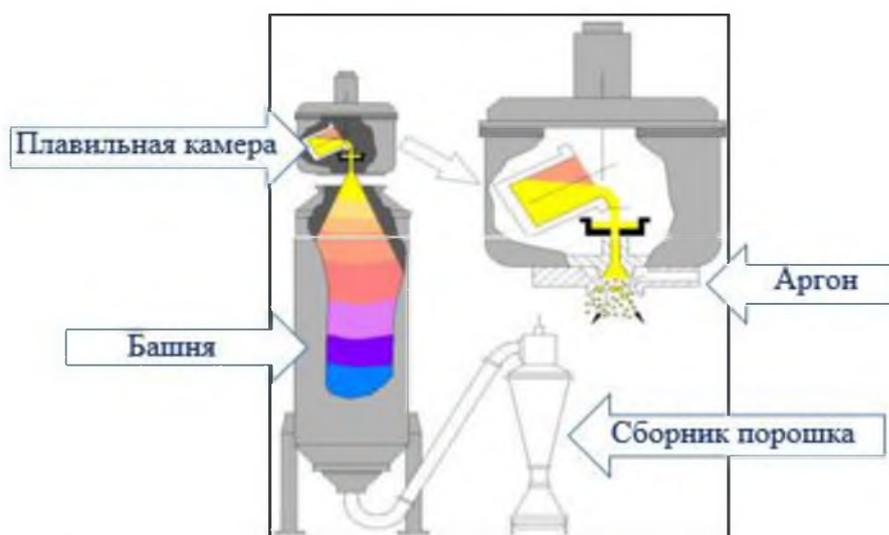


Рисунок 2 – Процесс газовой атомизации [37]

Вакуумную атомизацию осуществляют, используя плавильную и распылительную камеру. В плавильной камере происходит расплавление металла и создается избыточное давление газа (азота, гелия или водорода), который постепенно растворяется в расплаве. Затем, в распылительной камере создается атмосфера вакуума. Под действием разности давлений, металл движется в вверх, проходя через специальное сопло, которое выходит в распылительную камеру. Резкий перепад давления заставляет растворенный в металле газ выйти на поверхность капель расплава, разбрызгивая их и придавая сферическую форму [38–42].

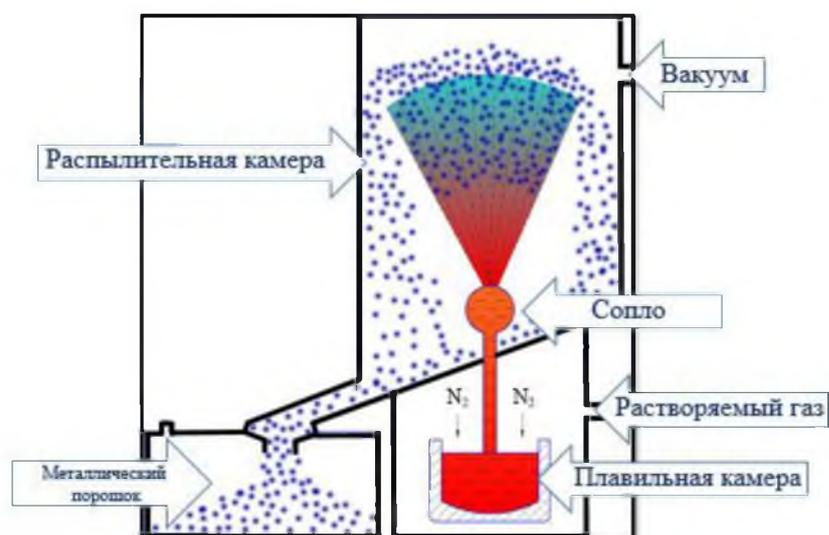


Рисунок 3 – Процесс вакуумной атомизации [43]

В центробежной атомизации, для получения сферической формы металлических частиц используют два электрода. Один из электродов – вольфрамовый, его жестко крепят на против второго – расходного, который непрерывно вращается на высокой скорости. Химический состав вращающегося электрода соответствует составу производимого порошка. В процессе работы между электродами возникает электрическая дуга, которая расплавляет расходный электрод. При этом, расплавленный металл, под действие центробежных сил, разбрызгивается в виде мелких капель. В полете частицы расплавленного металла приобретают сферическую форму [44–46].

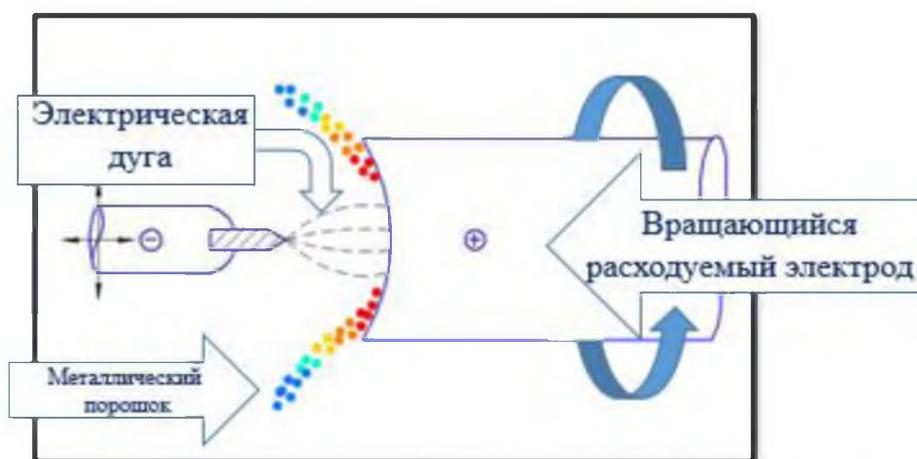


Рисунок 4 – Процесс центробежной атомизации [47]

Благодаря тому, что сырье для производства изделий аддитивными технологиями, является важной частью процесса, многие организации и исследовательские институты разрабатывают свои методы, которые имеют преимущества перед классическими [48].

В патенте ЗАО «СПЕЦХИММОНТАЖ» [49] описан метод плазменной обработки тугоплавких порошковых материалов. Метода связан с введением материала в высокотемпературную область плазменного потока, где происходит обработка порошков.

В одном из патентов [50], по тематике работы, был описан способ сфероидизации тугоплавких соединений в трубе. Труба находится под

высоким напряжением и располагается внутри вакуумной камеры. В самой трубе создается инертная атмосфера. Проходящие токи нагревают трубу до 3000 °С. Порошок пропускают через нагретую трубу. В процессе прохождения частицы расплавляются и приобретают сферическую форму.

Компания Индастриз Огайо, Инк. (США), разработала способ физического осаждения частиц порошка из паровой фазы. В камеру с частицами, находящимися в паровой фазе, вводят ионную жидкость. Температура в камере снижается и частицы оседают в ионную жидкость, приобретая сферическую форму [51].

Разработка АО «СХК» [52], описывает метод обработки магния тремя плазматронами, которые располагаются под углом к оси плазмохимического реактора. Металлический порошок, при помощи шнекового питателя эжекторного типа подается в зону обработки плазмой. Под воздействием высокой температуры поверхность частиц плавится и сглаживает все геометрические недостатки.

Северо-западный политехнический университет Китая разрабатывает метод сфероидизации порошков лазером [53]. Камеру с порошком заполняют инертным газом. Затем на частицы порошка воздействуют лазерным излучением. Под действием излучения частицы оплавляются и приобретают сферическую форму.

Компания Н.С. Starck GmbH предложила модифицировать способ сфероидизации частиц плазменным потоком [54]. Перед обработкой порошок измельчают и смешивают во фрикционной мельнице. Таким образом получается суспензия. Суспензию вводят в поток высокочастотной плазмы транспортирующим газом. В потоке плазмы частицы порошка приобретают сферическую форму.

В работе Овчиникова А.В. и др. [55] представлен способ получения околосферических титановых порошков методом гидрирования и дегидрирования. Порошки, полученные гидрированием, имеют форму, близкую к сферической [56]. Дегидрирование очищает порошок от примесей [57, 58]. Ряд

технологических операций улучшает форму частиц порошка. Полученный материал может быть использован в качестве альтернативного сырья для аддитивных технологий [59, 60].

В статье Кашапова Р.Н. и др. [61] для производства порошка со сферической формой частиц предлагают использовать технологию газового разряда с жидкими электродами [62–64], с представлением схемы экспериментальной установки. В работе установлено, что с повышением температуры процесса увеличивается производительность и размер частиц порошка. Полученный порошок имеет сферическую форму частиц и может использоваться в установках для селективного лазерного сплавления.

Сотрудники ФГУП ВИАМ ГНЦ РФ, в своей работе [17] для производства металлического порошка ЭП648-ВИ используют разработанную установку HERMIGA 10/100 VI. Расплавленный металл, через подогреваемую керамическую трубку, распыляют под высоким давлением. Полученный порошок имеет сферическую форму и размер частиц 10–200 мкм.

Для получения сферических порошков в статье Струкова Н.Н. [18] предлагается использовать распыление пруткового материала плазмой. Плазменная струя плавит торец прутка образуя каплю жидкого металла. Капля отрывается от поверхности прутка и в полете приобретает сферическую форму.

В статье Григорьева А.В. и др. [67] исследована плазменная сфероидизация порошков на основе сплавов Nb-Si [68, 69]. Установлено, что высокая температура процесса, не только позволяет сфероидизировать частицы порошка, но и испарять вредные примеси. Контроль основных параметров процесса (скорость подачи порошка, траектория движения порошка, расход плазмообразующего газа, мощность плазменного потока) позволит получить порошок с заданным составом и формой. [70–73].

За границей используется схожая технология, но уже поставленная на поток, компанией Tekna's Inductively Coupled Plasma (ICP). В статье Dr Maher Boulos [74] раскрываются основные направления деятельности этой компании

и описание процессов производства порошка для аддитивных технологий. Они также используют обработку порошков неправильной геометрической формы потоком плазмы, сфероидизируя их частицы. На конкретном примере процесс рассмотрен в статье R. Vert и др. [75], где были подробно исследованы процессы, происходящие со сплавами на основе титана, при сфероидизации в плазменном потоке.

Также плазменной обработкой порошков занимаются Корейские ученые, которые рассматривают в своих исследованиях [76] порошков из сплавов на основе титана. Причем сплавы были получены методом гидрирования и дегидрирования, после чего доработаны в плазменном потоке. Частицы приобрели сферическую форму и полностью соответствуют требованиям, предъявляемым к расходному сырью для аддитивных технологий.

В статье С. Дитриха и др. [77] описываются различные способы производства порошков для аддитивных технологий. Подробно рассмотрены установки для промышленного производства порошка и лабораторные установки. Авторы выделяют плазменную сфероидизацию, как наиболее эффективный метод получения качественных порошков. Описаны проблемы, связанные с качеством порошковых материалов для аддитивных технологий. Представлена концепция установки для сфероидизации порошков плазмой.

Маджид Энтезарян в своей работе [78] подробно рассматривает способ получения порошков из композитных материалов, при помощи плазменного распыления. Этот метод был использован для изготовления композита Al-TiAl₃, путем инъекции порошков, в тройную плазменную систему. Микроструктуры порошков, полученных плазменным распылением, сравнивались с порошковыми композитами, полученными традиционными методами. Микроструктура сильно зависела от способа обработки. Композиты, полученные традиционными методами, приобрели игольчатую структуру, а плазменная сфероидизация предала порошку сферическую форму и заданный размер. В процессе исследований было выявлено, что на величину

диаметра частиц порошка существенно влияет температурный режим плазменной струи. Также эксперименты показали, что высокая температура придает однородную структуру, а при низких температурах обработки, частицы порошка вступают в реакцию между собой.

В исследованиях П. Цантризода и др. [79], для получения тонких сферических порошков был разработан процесс плазменного распыления. В отличие от обычных форсунок высокого давления, авторы используют специально разработанный узел, для ускорения распыляющего газа. В процессе металлическая проволока подается в струю плазмы и распыляется, образуя частицы сферической формы. Этот способ позволяет производить сферические порошки из реакционноспособных металлов со средним размером частиц 40 мкм.

В научной работе Т Лаха и др. [80] частицы оксидов металлических порошков неправильной формы были распылены плазмой. В результате были получены частицы сферической формы, с узким диапазоном распределения. Распыление производилось в различных средах, а именно: воздух, вода и жидкий азот. Для количественного определения размера частиц, в различных средах, использовались методы рентгеновской дифракции. Было выявлено, что с увеличением скорости охлаждения, происходит увеличение размера нанозерен в частицах. Электронная микроскопия показала образование новых фаз после плазменной обработки композитных порошков.

Ученые из Китая исследовали влияние параметров плазменной сфероидизации на морфологию и размер частиц, обрабатываемых порошков [81]. Были обработаны порошки молибдена, неправильной формы. В процессе экспериментов была оптимизирована скорость подачи порошка, скорость потока газа. Морфологию порошка исследовали с помощью сканирующей электронной микроскопии. Фазовый состав анализировали методом рентгеновской дифракции. Средний размер частиц порошка был уменьшен в процессе обработки плазмой, а плотность порошка возросла. Кроме того, обработанный порошок отличается повышенной чистотой.

Результаты исследования доказывают перспективность метода плазменной сфероидизации.

В работе Ченфана Ю. [82], в качестве метода для сфероидизации тугоплавких металлов представлена плазменная сфероидизация. На порошках W и композита W-Ta, была экспериментально проверена эффективность метода. В результате обработки увеличилась плотность и текучесть порошка. Была получена сферическая форма с небольшим количеством неправильных частиц.

Ряд экспериментов по сфероидизации драгоценных металлов провела группа ученых из компании Tekna Plasma Systems Inc. [83]. Поскольку аддитивные технологии позволяют производить изделия сложной формы, они представляют огромный интерес для ювелиров. Поэтому авторами было принято решение, предложить альтернативный метод получения сферических порошков из драгоценных металлов. Этим методом стала плазменная сфероидизация. Были обработаны порошки Pt, Rh, Ir и их сплавы. Исследовали морфологию, плотность и текучесть обработанных металлических порошков. Полученные порошки отличаются высокой частотой и отсутствием дефектов в структуре частиц.

Японские ученые провели сравнительный анализ методов получения сферических порошков из серебра [84]. В качестве методов были выбраны технология водной атомизации и плазменная обработка. Серебряный порошок получали путем распыления воды с давлением 80 МПа и скоростью потока 220 л/мин. Анализ сканирующей электронной микроскопии показал, что собранные частицы серебра агрегированы и имеют различную морфологию: сферическую, сфероидальную и нерегулярную. Плазменная обработка значительно увеличила объем частиц сферической формы. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия показала, что содержание кислорода в частицах серебра уменьшилось с 500 ppm до 45 ppm. Термомеханический анализ показал, что усадка серебряного порошка уменьшена за счет плазменной обработки. В результате было выявлено, что

характеристика частиц порошка серебра была значительно модифицирована плазменной обработкой.

В работе китайских ученых [85] также в качестве сфероидизации так же использовали обработку порошка плазмой. Сферический порошок сплава на основе Nb-Ti был получен комбинацией плазменной сфероидизации и механическое легирование. Результаты показывают, что нерастворенные легирующие элементы достигают со сплавом однородной фазы, в процессе сфероидизации. Размер частиц находится в диапазоне 20–110 мкм. При уменьшении размера частиц происходит переход к мелкозернистой структуре. Поверхность сфероидизированного порошка покрывается слоем оксидов, состоящих в основном из TiO_2 и Nb_2O_5 . Вероятность образования агломерата и коалесценции частиц возрастает с увеличением температуры плазмы, а обработка в вакууме снижает количество пор и способствует их однородному распределению в объеме частиц.

Влияние плазменной обработки на частицы порошка были опубликованы в статье Dr. C. Jin и др. [86]. Сферический молибденовый порошок был получен при помощи плазменной обработки геометрически неправильных частиц. Изучалось влияние скорости потока газа-носителя и скорости подачи порошка молибдена, на форму и размер конечных продуктов. В ходе исследований было выявлено, что плазма не только сфероидизирует порошок, но и очищает от примесей, уменьшает размер частиц, увеличивая их плотность.

Из выше перечисленных исследований видно, что большинство ученых, которые работают над производством качественного сферического порошка, для аддитивных технологий, склоняются к выбору плазменной сфероидизации.

Это происходит потому, что традиционные методы атомизации металлического порошка имеют ряд существенных недостатков. К ним относят: высокую стоимость процесса, отсутствие возможности изготовления тугоплавких материалов, что ограничивает спектр выбора металлических

порошков и соответственно сужает сферу применения аддитивных технологий в промышленности. Также к недостаткам можно отнести время на переналадку оборудования, под каждый конкретный материал, которая может занимать более восьми часов [87].

Эти недостатки лимитируются методом плазменной обработки стандартных металлических порошков, с формой частиц, отличной от сферической [88].

Порошок, синтезированный в плазме, принято классифицировать следующим образом: от 1 до 100 нм – ультрадисперсные; от 100 нм до 10 мкм – тонкодисперсные; от 10 до 200 мкм – среднедисперсные; от 200 до 1000 мкм – грубодисперсные [89, 90].

Процесс обработки в общем виде выглядит следующим образом. Стандартный металлический порошок, не предназначенный, для использования в установках аддитивного производства, который имеет геометрические недостатки, помещают в поток плазмы. Оплавляясь частицы порошка, под действие сил поверхностного натяжения, приобретают сферическую форму [91].

В первую очередь форма частиц зависит от условий и режимов самого процесса плазменной обработки, не мало важную роль также играют физико-химические свойства обрабатываемого порошка. Если металл в жидком состоянии обладает большим поверхностным натяжением, то под его воздействием частицы приобретут сферическую форму. В случае плохо отработанного процесса, или если металл имеет низкое поверхностное натяжение, частицы могут кристаллизоваться раньше времени, чем поверхностное натяжение придаст им сферическую форму. В результате частицы порошка могут иметь неправильную, разноосную форму [92].

Сфера имеет внутреннее давление, идущее от центра, во всех направления, к поверхности, а поверхностное натяжение связывает молекулы металла в сферическом положении (Рисунок 5). Частицы формируются в сферу,

так как эта форма требует минимального уровня поверхностного натяжения, т.е. минимальных затрат энергии на приобретение такой формы [93].

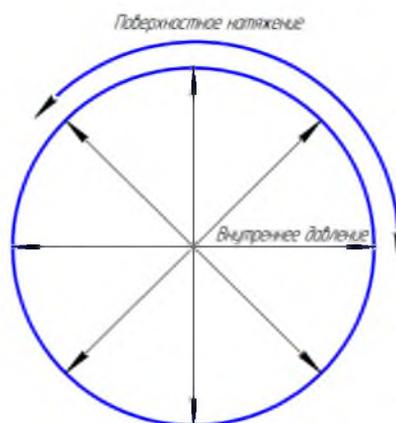


Рисунок 5 – Схема сферической частицы металла

Если разрезать расплавленную сферическую частицу металла, таким образом, чтобы левая и правая половины были равны, возможно использование уравнения Лапласа, которое позволяет выяснить, что:

$$F = P \cdot \frac{R}{2}, \quad (1)$$

где F – поверхностное натяжение, Н/м;

P – внутреннее давление, Па;

R – радиус частицы, м.

Эта формула показывает, что для приобретения сферической формы требуется минимальное поверхностное натяжение.

Каждая частица, находящаяся в струе плазмы, испытывает значительные тепловые нагрузки, но так как скорость обработки очень высока, частица не успевает расплавиться до конца (Рисунок 19), особенно это применимо к частицам размерами выше 100 мкм из тугоплавких металлов [94]. Для плазменной обработки как раз подходит порошок такой фракции, это позволяет предотвратить прилипание частиц порошка к стенкам инжектора.

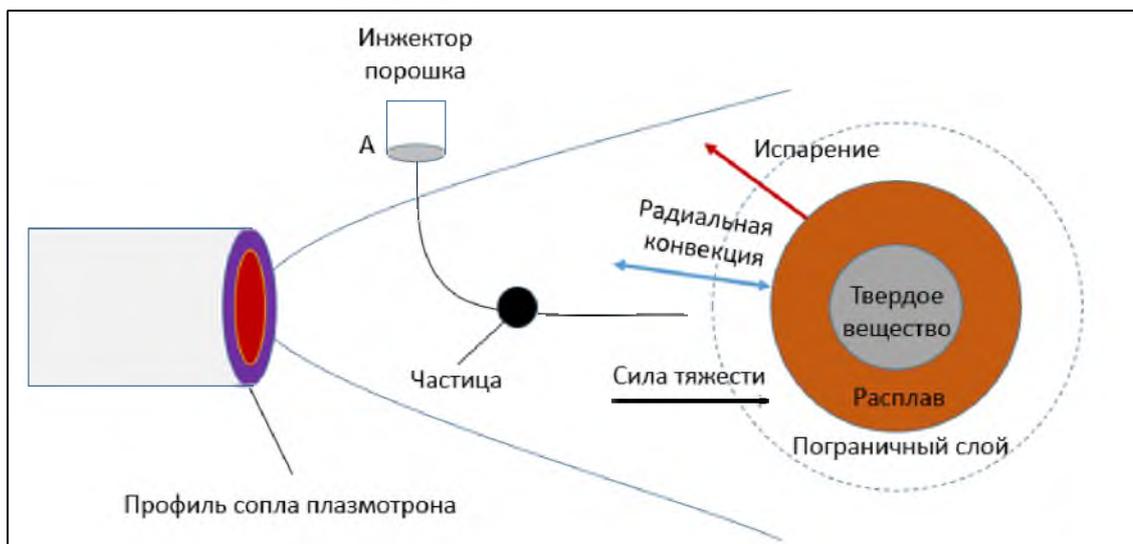


Рисунок 6 – Схематическое изображение дискретной частицы, движущейся в струе плазмы и ее нагревание [95]

Нагрев частиц в плазменной струе описывается уравнением теплопроводности для сферических тел.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (2)$$

$$0 < r < R, t_A < t < t_L,$$

$$H = \rho \int_{T_0}^T c dT + \rho \chi_m. \quad (3)$$

где $H(T)$ – энтальпия, кДж;

T – температура, К;

R – радиус частицы, м;

t – время нагрева частицы, с;

t_A – время в точке А (Рисунок 6), с;

t_L – время на осевом расстоянии L , с;

λ – теплопроводность, Вт/(м·К);

c – теплоемкость, Дж/(кг·К);

ρ – плотность кг/м³,

χ_m – скрытая теплота плавления, К.

Граничные условия определяются как:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad (4)$$

$$\lambda_p \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = q - \chi_v g_v, \quad (5)$$

$$q = \alpha(T_g - T(R)) + \xi \sigma_0 (T_g^4 - T(R)^4), \quad (6)$$

где q – тепловой поток от газа в частицу, Вт/м²;

α – коэффициент обмена конвективного тепла между частицей и плазменной струей;

ξ – радиационный теплообмен через коэффициент излучательной способности, Вт/м²;

T_g – температура газа в месте расположения частицы, К;

$T(R)$ – температура поверхности частицы, К;

χ_v – теплота испарения, Дж/кг;

$g_v(T)$ – удельный поверхностный массовый расход испарения, кг/с;

σ – постоянная Стефана-Больцмана.

При нагреве частицы в струе плазмы происходит испарение металла с ее поверхности, при этом радиус частицы может измениться. Этот постоянно изменяемый радиус можно вычислить в каждый конкретный момент времени, при помощи уравнения баланса массы:

$$\frac{dm}{dt} = g_v S, \quad (7)$$

где m – масса частицы, равная $m = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho$, кг;

S – область поверхности частицы, равная $S = 4\pi R^2$, м².

При попадании в плазменную струю частицы металла получают разнообразную траекторию движения и значение скорости.

Скорость частиц и траекторию можно получить, приравняв второй закон Ньютона к аэродинамической силе сопротивления, действующей на поверхность частицы во время ее полета в плазменном потоке. Для этой цели, скорость отдельно взятых частиц определяется как производная по времени от

координаты центра частицы. Данное уравнение записывается следующим образом:

$$\frac{d(m\vec{v})}{dt} = \vec{F},$$

$$\vec{F} = C_d S_m \frac{\rho_g (\vec{u} - \vec{v}) |\vec{u} - \vec{v}|}{2} + m\vec{g}, \quad (8)$$

где v – скорость частиц, м/с;

u – локальная скорость свободного течения, учитывающая взаимодействие с распыленной частицей, м/с;

F – вектор аэродинамической силы тяги;

C_d – коэффициент переноса сферической частицы;

S_m – площадь поперечного сечения частицы, равная $S_m = \pi R^2$, м²;

ρ_g – плотность окружающего газа, кг/м³;

g – это гравитационное ускорение, м/с².

Коэффициент конвективного теплообмена и аэродинамического сопротивления для сферической частицы описывается следующим образом:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda_g}{2R}, \quad (9)$$

$$\begin{cases} 24 \text{ Re}, & \text{Re} \leq 0.2 \\ 24 \text{ Re}^{-1} + 3.6 \text{ Re}^{-0.317}, & 0.2 < \text{Re} \leq 4.0 \\ 24 \text{ Re}^{-1} + 4 \text{ Re}^{-0.333}, & 4.0 < \text{Re} \end{cases}, \quad (10)$$

$$Nu = 2 \frac{\lambda_g}{\lambda} + 0.5 \text{ Re}^{0.5} \text{ Pr}^{0.4} \left(\frac{\rho_g |_{r \gg R} \eta_g |_{r \gg R}}{\rho_g |_{r=R} \eta_g |_{r=R}} \right)^{0.2}, \quad (11)$$

$$\text{Re} = 2R \rho_g |u - v| / \eta_g, \quad (12)$$

$$\text{Pr} = C_g \eta_g / \lambda_g, \quad (13)$$

где Nu – число Нуссельта;

Re – число Рейнольдса;

Pr – число Прандтля;

η – динамическая вязкость плазменной струи, Па/с;

λ_g – теплопроводность плазменной струи в точке расположения частицы, рассчитанная при температуре поверхности частицы, Вт/(м·К);

ρ_g – плотность плазменной струи в точке расположения частицы, рассчитанная при температуре поверхности частицы, кг/м³;

η_g – динамическая вязкость плазменной струи в точке расположения частицы, рассчитанная при температуре поверхности частицы, Па/с;

C_g – теплоемкость плазменной струи в точке расположения частицы, рассчитанная при температуре поверхности частицы, кДж/кг·К.

Частицы, впрыскиваемые в плазменную струю, ускоряются и нагреваются газом. В то же время струя замедляется и охлаждается из-за влияния инжектированных частиц [95]. Чтобы учесть этот эффект, реализуется метод «двухсторонней связи», что достигается за счет сочетания импульса с энергией потока жидкости и уравнениями энергии частицы с помощью элементов S_V и S_H . Эти элементы включают импульс, потерю энергии из-за ускорения и нагрева частицы в потоке плазменной струи и определяется как:

$$S_v = \frac{1}{\delta V} \sum_{k=1}^b \vec{F}_k S_k, \quad (14)$$

$$S_H = \frac{1}{\delta V} \sum_{k=1}^b q_k S_k, \quad (15)$$

$$n_t = \frac{3}{4\pi R_0^3} \frac{G_M}{\rho}, \quad (16)$$

где S_V , S_H – локальные значения тепла плазменной струи и потеря механического импульса за счет взаимодействия плазменного потока с частицами, К;

b – число частиц в заданный момент времени, шт;

δV – объем плазменной струи, м³;

n_t – целая часть количества частиц, однородно распределенных на диаметр форсунки инжектора, шт;

G_M – скорость подачи частиц, м/с.

Исходное состояние частицы при загрузке плазменного потока определяется как $S_V = 0$, $S_H = 0$, $G_M = 0$.

Выше указанные уравнения, позволяют вычислять скорость частицы, ее траекторию, кинетику радиального распределения температуры в частице и массовые потери при испарении. Все эти параметры могут быть рассчитаны в зависимости от состава материала, начальной температуры и диаметра частиц, скорости их подачи и условий введения частиц в плазменную струю [96].

Приобретения сферическая форма, придает порошку свойства, необходимые для аддитивного производства.

К ним относится, улучшение «текучести». Это обозначает, что сфероидизация обеспечивает однородную сыпучесть порошка, что позволяет точно контролировать скорость его подачи в зону построения изделия. Увеличивается насыпная плотность, происходит устранение внутренних полостей и трещин каждой отдельно взятой частицы, что увеличивает их общую твердость. Макроскопическая поверхность частиц, обработанных плазмой, становится гладкой, за счет чего они не агломерируются и не загрязняются, во время переноса газом. Чистота порошка также возрастает, благодаря высокой температуре плазмы, которая испаряет большинство вредных примесей [97].

Как можно заметить на процесс формирования сферической формы частиц влияет огромное количество факторов. В результате, мы получаем технологию, которая может производить сферические порошки, для аддитивных технологий, из любых металлов, с заданными свойствами, что без сомнений дает ей преимущество перед известными традиционными технологиями сфероидизации [98].

2 Объект и методы исследования

Аддитивные технологии, являются инновационным методом изготовления изделий сложной формы. Метод очень требователен к расходному материалу, которым является металлический порошок, со сферической формой частиц. Сферическая форма придает материалу однородную сыпучесть, для контролируемой подачи порошка в зону построения, увеличивает насыпную плотность и облегчает работу лазера по спеканию частиц между собой [99].

Наиболее эффективным методом получения сферической формы частиц порошка является плазменная обработка. Она имеет ряд преимуществ перед традиционными методами получения сферических порошков. Плазменная сфероидизация позволяет обрабатывать не только легкоплавкие металлические порошки, но и любые тугоплавкие. Замена обрабатываемого материала и переналадка оборудования производится в течении пары часов, в отличии от традиционных методов атомизации, где такой процесс может превысить восьмичасовой порог. Так же плазменная сфероидизация, благодаря высоким температурам, при обработке, полностью испаряет вредные примеси, что не доступно традиционным методам [100].

Таким образом плазменная обработка является важнейшим звеном в производственной цепочке получения готовых изделий аддитивными лазерными технологиями (Рисунок 7).



Рисунок 7 – Технологическая схема получения сложнопрофильных изделий аддитивными технологиями, с использованием плазменной сфероидизации стандартных металлических порошков

Процесс обработки в общем виде выглядит следующим образом, стандартный металлический порошок, не предназначенный для использования в установках для аддитивного производства, который имеет геометрические недостатки, помещают в поток плазмы, где оплавляясь, частицы порошка, под действие сил поверхностного натяжения, приобретают сферическую форму.

В первую очередь форма частиц зависит от условий и режимов самого процесса плазменной обработки, не мало важную роль также играют физико-химические свойства обрабатываемого порошка. Если металл в жидком состоянии обладает большим поверхностным натяжением, то под его воздействием частицы приобретут сферическую форму. В случае плохо отработанного процесса или если металл имеет низкое поверхностное натяжение, частицы могут кристаллизоваться раньше времени, чем поверхностное натяжение придаст им сферическую форму; тогда частицы порошка могут иметь неправильную форму [101].

Для того чтобы в полной мере проверить эффективность выбранного метода сфероидизации металлического порошка, было принято решение подвергнуть плазменной сфероидизации как легкоплавкие, так и тугоплавкие металлические порошки, с геометрической формой, не подходящей, для использования в аддитивных технологиях (Таблица 1, 2, 3).

Таблица 1 – Химический состав исходного металлического порошка, марки ПМС-1, предназначенного для плазменной сфероидизации

Марка	Химический состав, %						
	Cu	Fe	As	Pb	Sb	O	N
ПМС-1	86.3	0.018	0.003	0.05	0.005	0.2	12.7

Таблица 2 – Химический состав исходного металлического порошка, марки НБП-2, предназначенного для плазменной сфероидизации

Марка	Химический состав, %							
	Nb	Ta	Ti	W	Mo	O	N	Fe
НБП-2	81.7	0.1	0.001	0.005	0.005	0.2	17.3	0.003

Таблица 3 – Химический состав исходного металлического порошка, системы Ti-Nb, предназначенного для плазменной сфероидизации

Порошок	Химический состав, %				
	Ti	Nb	N	Ta	O
Ti-Nb	39.5	36.2	22.1	1.4	-

Для проведения эксперимента использовался электродуговой плазмотрон постоянного тока, с секционированной межэлектродной вставкой, марки «ПНК-50» (Рисунок 21), разработанный в ИТПМ СО РАН. Номинальная мощность плазмотрона – 50 кВт, производительность обработки металлических порошков – до 30 кг/час, керамических – до 10 кг/час. Среднемассовая температура потока воздушной, или азотной плазмы на срезе сопла плазмотрона – до 7000 К, аргоновой плазмы – до 11000 К, что позволяет обрабатывать не только легкоплавкие, но и тугоплавкие металлы и керамику.

Плазмотрон укомплектован узлом кольцевого ввода порошка с его газодинамической фокусировкой [102]. Узел кольцевого ввода обеспечивает равномерный, распределённый ввод порошка в поток термической плазмы, что существенно повышает производительность и эффективность обработки порошков.



Рисунок 8 – Внешний вид электродугового плазмотрона постоянного тока с секционированной межэлектродной вставкой марки «ПНК-50»

По результатам плазменной обработки необходимо произвести химический анализ и изучить гранулометрический состав порошка. Для этих целей будет использована система с электронными и сфокусированными пучками QUANTA 200 3D (Рисунок 9).



Рисунок 9 – Внешний вид системы с электронными и сфокусированными пучками QUANTA 200 3D [103]

Источником электронов в растровом электронном микроскопе QUANTA 200 3D является термоэмиссионный вольфрамовый катод. Ускоряющее напряжение электронов может регулироваться в пределах от 200 В до 30 кВ. Ток пучка электронов изменяется в диапазоне от 0,5 пА до 0,5 мкА и независимо может измеряться пикоамперметром Keithley 6485.

Микроскоп имеет двухступенчатую систему откачки. Вакуумная система микроскопа имеет три режима: высокий вакуум, низкий вакуум и естественная среда.

В микроскопе имеются инжекторы металлоорганики для осаждения вольфрама и платины, а также инжектор ХеF₂ для ускоренного травления материала.

QUANTA 200 3D оборудован литографической системой Raith ELPHY Quantum, предельное разрешение которой составляет ~ 60 нм [103].

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

5.1 Планирование управления научно-техническим проектом

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей.

5.1.1 Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта.

Значимость ИСР возрастает с ростом масштаба задачи. Являясь одним из ключевых факторов успеха проекта, иерархическая структура работ служит основой для:

1. детального понимания того, как мы будем решать задачу проекта;
2. планирования ресурсов, стоимости, рисков, качества, расписания;
3. четкого распределения ответственности между участниками и организации взаимодействия между ними;
4. организации контроля выполнения работ и изменений;
5. отчетности о выполнении мероприятий и всей задачи в целом;
6. создания организационной структуры проекта.

Важным элементом структуры выступают пакеты работ, представляющие собой списки операций, в процессе выполнения которых достигается результат вышестоящей задачи [115].

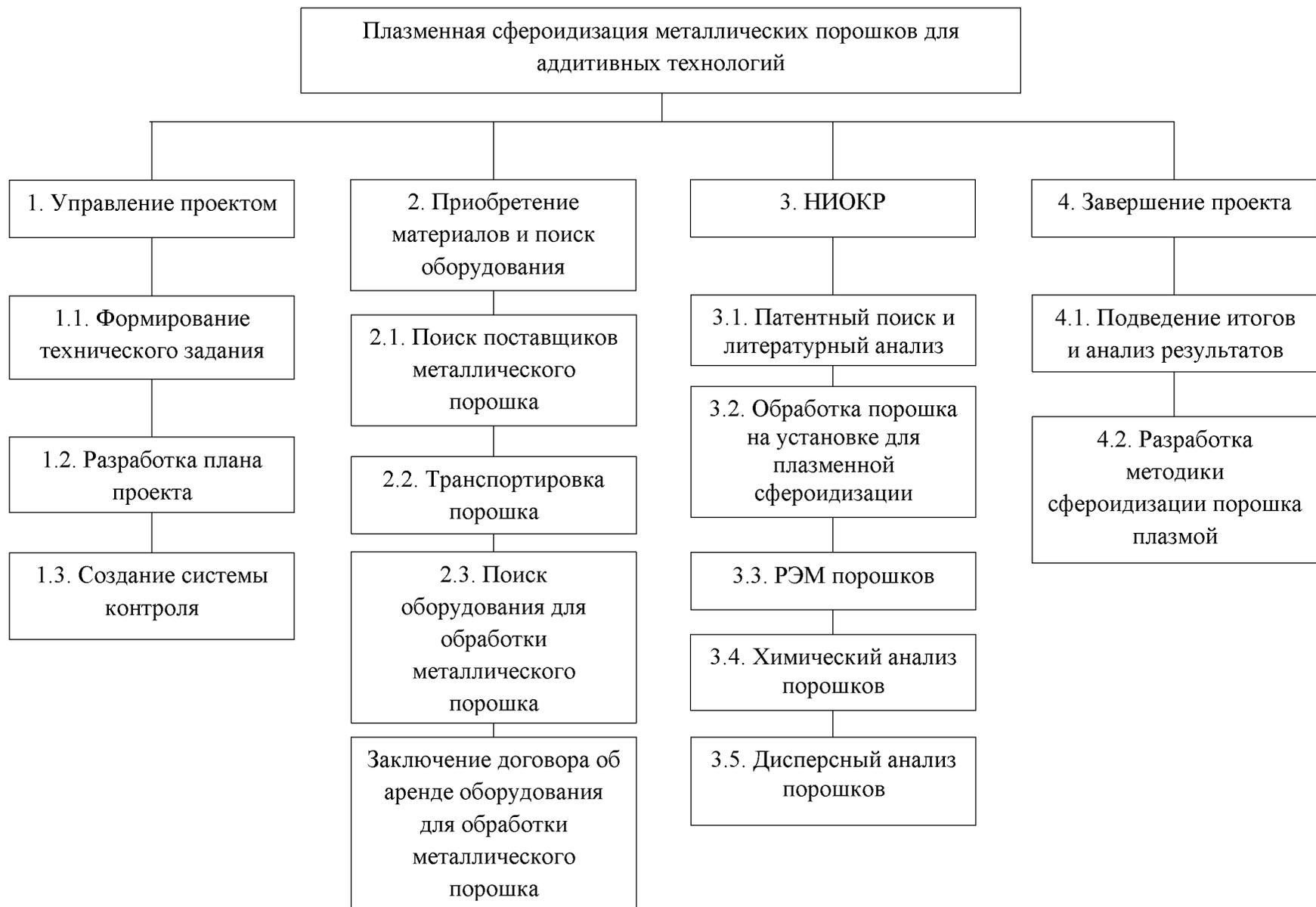


Рисунок 46 – Иерархическая структура работ проекта

5.1.2 Контрольные события проекта

В рамках данного раздела определить ключевые события проекта, определить их даты и результаты, которые должны быть получены по состоянию на эти даты. Эту информацию необходимо свести в таблицу 22.

Таблица 22 – Контрольные события проекта

№ п/п	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Разработка плана проекта	07.10.2016	Календарный план
2	Транспортировка металлического порошка	03.04.2017	Смета затрат на приобретенные порошки
3	Обработка порошка на установке для плазменной сфероидизации	17.10.2017	Отчет о выполненных работах по плазменной сфероидизации
4	РЭМ обработанных порошков	10.11.2017	Отчет результатов РЭМ, химического и дисперсного анализа обработанных порошков
	Химический анализ обработанных порошков	08.12.2017	Отчет результатов химического анализа порошков
	Дисперсный анализ обработанных порошков	22.12.2017	Отчет результатов и дисперсного анализа порошков
5	Разработка методики сфероидизации порошка плазмой	28.04.2018	Итоговый отчет по НИР

5.1.3 Календарный план проекта

В рамках планирования необходимо построить календарный план-график научного проекта по теме, в соответствии с ИРС. Данные для формирования календарного плана-графика взяты из линейного графика, который представлен в таблице 23.

График строится в виде таблицы с разбивкой по месяцам за период времени выполнения научного проекта. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу [115].

Таблица 23 – Календарный пан проекта

Код работы (из ИСР)	Название	Дата начала работ	Длительность, дни	Задержка, дни	Дата окончания работ	ФИО ответственных исполнителей
1.	Управление проектом					
1.1.	Формирование технического задания	14.09.2016	24	9	07.10.2016	Сапрыкин А.А.
1.2.	Разработка плана проекта	17.10.2016	26	0	11.11.2016	Сапрыкин А.А., Дудихин Д.В.
1.3.	Создание системы контроля	08.12.2016	16	44	23.12.2016	Сапрыкин А.А.
2.	Приобретение материалов и поиск оборудования					
2.1.	Поиск поставщиков металлического порошка	06.02.2017	29	0	06.03.2017	Дудихин Д.В.
2.2.	Транспортировка порошка	07.03.2017	28	6	03.04.2017	Дудихин Д.В.
2.3.	Поиск оборудования для обработки металлического порошка	10.04.2017	26	2	05.05.2017	Дудихин Д.В.
2.4.	Заключение договора об аренде оборудования для обработки металлического порошка	08.05.2017	25	94	01.06.2017	Сапрыкин А.А.

Код работы (из ИСР)	Название	Дата начала работ	Длительность, дни	Задержка, дни	Дата окончания работ	ФИО ответственных исполнителей
3.	НИОКР					
3.1.	Патентный поиск и литературный анализ	04.09.2017	10	2	15.09.2017	Дудихин Д.В.
3.2.	Обработка порошка на установке для плазменной сфероидизации	18.09.2017	28	9	17.10.2017	Сапрыкин А.А., Дудихин Д.В.
3.3.	РЭМ порошков	27.10.2017	13	2	10.11.2017	Дудихин Д.В.
3.4.	Химический анализ порошков	13.11.2017	24	2	08.12.2017	Дудихин Д.В.
3.5.	Дисперсный анализ порошков	11.12.2017	10	79	22.12.2017	Дудихин Д.В.
4.	Завершение проекта					
4.1.	Подведение итогов и анализ результатов	12.03.2018	19	2	30.03.2018	Дудихин Д.В.
4.2.	Разработка методики сфероидизации порошка плазмой	02.04.2018	27	0	28.04.2018	Дудихин Д.В.

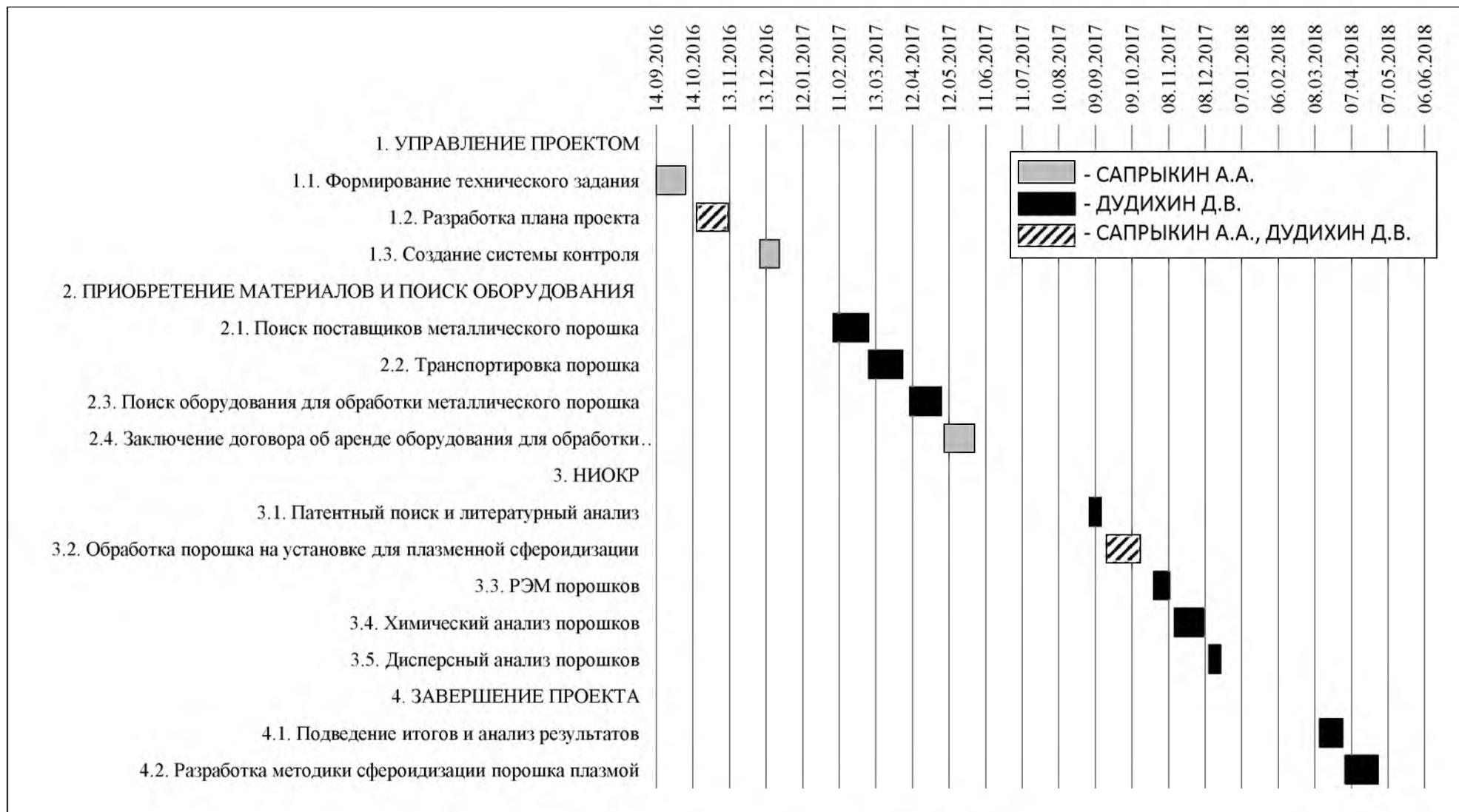


Рисунок 47 – Календарный план-график проекта

5.2 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения [115]. В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям, представленным в таблице 32.

5.2.1 Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3–5 % от цены) [115]. Результаты по данной статье заносятся в таблицу 24.

Таблица 24 – Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты (за вычетом отходов).

Наименование	Марка	Кол-во	Цена за кг, руб.	Сумма, руб.
Титановый порошок	ПТС-1 ТУ 14-22-57-92	2	5000	10000
Ниобиевый порошок	НБП-26 ГОСТ 26252-84	2	18000	36000
Медный порошок	ПМС-1 ГОСТ 4960-2009	2	965	1930
Всего за материалы				47930
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				1917.2
Итого по статье сырье и материалы				49847.2

5.2.2 Расчет основной заработной платы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников участвующих в выполнении работ по данной теме [115]. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. Расчет основной заработной платы сводится в таблицу 25.

Таблица 25 – Расчет основной заработной платы

Код ИСР	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудоемкость, чел-дн.	ЗПД, на 1 чел-дн., руб.	Всего заработная плата по тарифу, руб.
1.	Управление проектом				
1.1.	Формирование технического задания	Руководитель	24	1355.66	32535.84
1.2.	Разработка плана проекта	Руководитель, инженер	26	2210.82	57481.32
1.3.	Создание системы контроля	Руководитель	16	1355.66	21690.56
2.	Приобретение материалов и поиск оборудования				
2.1.	Поиск поставщиков металлического порошка	Инженер	29	855.16	24799.64
2.2.	Транспортировка порошка	Инженер	28	855.16	23944.48
2.3.	Поиск оборудования для обработки металлического порошка	Инженер	26	855.16	22234.16
2.4.	Заключение договора об аренде оборудования для обработки металлического порошка	Руководитель	25	1355.66	33891.5

Код ИСР	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудоемкость, чел-дн.	ЗПЛ, на 1 чел-дн., руб.	Всего заработная плата по тарифу, руб.
3.	НИОКР				
3.1.	Патентный поиск и литературный анализ	Инженер	10	855.16	8551.6
3.2.	Обработка порошка на установке для плазменной сфероидизации	Руководитель, инженер	28	2210.82	61902.96
3.3.	РЭМ порошков	Инженер	13	855.16	11117.08
3.4.	Химический анализ порошков	Инженер	24	855.16	20523.84
3.5.	Дисперсный анализ порошков	Инженер	10	855.16	8551.6
4.	Завершение проекта				
4.1.	Подведение итогов и анализ результатов	Инженер	19	855.16	16248.04
4.2.	Разработка методики сфероидизации порошка плазмой	Инженер	27	855.16	23089.32
Основная заработная плата руководителя					161323.54
Основная заработная плата инженера					205238.4
Итого:					366561.94

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

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (18)$$

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

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

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

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб}, \quad (19)$$

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

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дней (Таблица 4);

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

4.2.3 Расчет среднедневной заработной платы

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (20)$$

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

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 36 раб. дней, $M = 11.1$ месяца, 5-дневная неделя; при отпуске в 28 раб. дней $M = 10.8$ месяца, 5-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дней. (Таблица 5).

Расчет среднедневной заработной платы руководителя проекта:

$$Z_{дн} = \frac{23205 \cdot 11.1}{190} = 1355.66 \text{ руб.},$$

Расчет среднедневной заработной платы инженера:

$$Z_{дн} = \frac{15678 \cdot 10.8}{198} = 855.16 \text{ руб.}$$

Таблица 26 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней (выходные и праздничные дни)	118	118
Потери рабочего времени		
• отпуск	36	28
• невыходы по болезни	21	21
Действительный годовой фонд рабочего времени	190	198

5.2.4 Расчет месячного должностного оклада работника

Месячный должностной оклад работника рассчитывается по формуле:

$$Z_m = Z_b \cdot (k_{пр} + k_d) \cdot k_p, \quad (21)$$

где, Z_b – базовый оклад, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент;

k_d – коэффициент доплат и надбавок (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: определяется Положением об оплате труда);

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

Основная заработная плата руководителя (от ТПУ) рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы [115]:

1. оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор. Базовый оклад Z_b определяется исходя из размеров окладов, определенных штатным расписанием предприятия;

2. стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.;

3. иные выплаты;

4. районный коэффициент.

Расчет месячного должностного оклада руководителя проекта:

$$Z_m = 29750 \cdot (0.3 + 0.3) \cdot 1.3 = 23205 \text{ руб.},$$

Расчет месячного должностного оклада инженера:

$$Z_m = 20100 \cdot (0.3 + 0.3) \cdot 1.3 = 15678 \text{ руб.}$$

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 27.

Таблица 27 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	З _б , руб.	k _{пр}	k _д	k _р	З _м , руб.	З _{дн} , руб.	T _р , раб. дн.	З _{осн} , руб.
Руководитель	29750	0.3	0.3	1.3	23205	1355.66	119	161323.54
Инженер	20100	0.3	0.3	1.3	15678	855.16	240	205238.4

5.2.5 Расчет дополнительной заработной платы персонала

В данную статью включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде, например, оплата очередных и дополнительных отпусков; оплата времени, связанного с выполнением государственных и общественных обязанностей; выплата вознаграждения за выслугу лет и т.п. (в среднем – 12 % от суммы основной заработной платы) [115].

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10–15 % от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}, \quad (22)$$

где, $Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной зарплаты, 0.13;

$Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата, руб.

Дополнительная заработная плата руководителя проекта:

$$Z_{\text{доп}} = 0.13 \cdot 161323.54 = 20972.06 \text{ руб.},$$

Дополнительная заработная плата инженера:

$$Z_{\text{доп}} = 0.13 \cdot 205238.4 = 26680.99 \text{ руб.}$$

В таблице 28 приведена форма расчёта основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 28 – Заработная плата исполнителей проекта

Заработная плата	Руководитель	Инженер
Основная зарплата	161323.54	205238.4
Дополнительная зарплата	20972.06	26680.99
Итого по статье заработная плата	414214.99	

4.2.6 Расчет отчислений на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды:

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (23)$$

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

Для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2018 году вводится ставка – 30 %.

Отчисления во внебюджетные фонды рекомендуется представлять в табличной форме (Таблица 29).

Таблица 29 – Отчисления во внебюджетные фонды

Название статьи	Руководитель	Инженер
Основная заработная плата, руб.	161323.54	205238.4
Дополнительная заработная плата, руб.	20972.06	26680.99
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,3	
Итого, руб.	54688.68	69575.82
Сумма отчислений во внебюджетные фонды, руб.	124264.5	

5.2.7 Научные и производственные командировки

В эту статью включаются расходы по командировкам научного и производственного персонала, связанного с непосредственным выполнением конкретного проекта, величина которых принимается в размере 10% от основной и дополнительной заработной платы всего персонала, занятого на выполнении данной темы [115].

Таблица – 30 Научные и производственные командировки

Название статьи	Руководитель	Инженер.
Основная заработная плата, руб.	161323.54	205238.4
Дополнительная заработная плата, руб.	20972.06	26680.99
Коэффициент отчислений на командировочные расходы	0.1	
Итого, руб.	18229.56	25860.038
Сумма затрат на научные и производственные командировки, руб.	44089.6	

5.2.8 Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями

На эту статью относится стоимость контрагентных работ, т.е. работ, выполненных сторонними организациями и предприятиями по заказу данной научно-технической организации, результаты которых используются в конкретном НИИ. Кроме того, на эту статью расходов относят оплату консультаций, использование Internet и т.д. Величина этих расходов определяется по договорным условиям [115].

Таблица 31 – Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями

Название организации	Наименование выполняемых работ	Стоимость услуг, руб.
ИТПМ СО РАН	Сфероидизация металлических порошков плазмой	60000
ТРЦКП	РЭМ порошков	2500
ТРЦКП	Химический анализ порошков	2700
Итого затрат на выполнение услуг сторонними организациями		65200

5.2.9 Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. В расчетах эти расходы принимаются в размере 70 - 90 % от суммы основной заработной платы научно-производственного персонала данной научно-технической организации [115].

Накладные расходы составляют 80–100 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (24)$$

где, $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов.

Расчет накладных расходов проекта:

$$C_{\text{накл}} = 0.8 \cdot 414214.99 = 293249.55 \text{ руб.}$$

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости НТИ (название темы) по форме, приведенной в таблице 32.

Таблица 32 – Группировка затрат по статьям

Статьи	Сумма, руб.
Сырье и материалы	49847.2
Основная заработная плата	366561.94
Дополнительная заработная плата	47653.05
Отчисления на социальные нужды	124264.5
Научные и производственные командировки	44089.6
Выполнение услуг сторонними организациями	65200
Накладные расходы	293249.55
Итого плановая себестоимость	990865.84

Список публикаций студента

1. Дудихин Д.В. Применение плазменной обработки для производства специализированного металлического порошка. Материалы 24-й межвузовской (Региональной) научной студенческой конференции «Интеллектуальный потенциал Сибири» – Новосибирск: Изд-во НГТУ, – 2017. С. 130–135.
2. Дудихин Д.В., Сапрыкин А.А. Применение плазменной обработки для производства специализированного металлического порошка // Электронный журнал «Технологии и материалы». – 2017. С. 13–19.
3. Сапрыкин А.А., Кузьмин В.И., Сергачев Д.В., Дудихин Д.В. Применение плазменной обработки для сфероидизации металлических порошков // Актуальные проблемы в машиностроении. Т.4, No.2. – 2017. С. 16–20.
4. Дудихин Д.В., Сапрыкин А.А. Способы получения сферических порошков для аддитивных лазерных технологий / Материалы всероссийской научно-практической конференции аспирантов и студентов «Фундаментальные и прикладные исследования в области материаловедения и машиностроения 2015» // Электронный журнал Master's Journal / Изд-во ПНИПУ, – 2016. С. 51–55.
5. Дудихин Д.В. Применение плазменной обработки для производства специализированных металлических порошков // Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении: сборник трудов VII Всероссийской научно-практической конференции для студентов и учащейся молодежи. В 2-х томах. Том 1 / Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, – 2016. – 640 с.
6. Gizatulin R.A., Kozyrev N.A., Saprykin A.A., Sheshukov O.Y., Dudikhin D.V. Nitrogen Alloying of Steel by Blowing in the Ladle through Bottom and Submersible Tuyeres // Applied Mechanics and Materials. – 2015 – Vol. 770. – p. 14–18

7. Saprykin A.A., Babakova E.V., Ibragimov E.A., Dudikhin D.V. Prospects of Creating Products Using Selective Laser Sintering // Applied Mechanics and Materials. – 2015 – Vol. 770. – p. 608–611

8. Saprykin A.A., Ibragimov E.A., Babakova E.V., Dudikhin D.V., Sharkeev Y.P. Forming a single layer of a composite powder based on the Ti-Nb system via selective laser melting (SLM) / International Seminar on Interdisciplinary Problems in Additive Technologies Tomsk, 16–17 December 2015. p. 1–9.

9. Сапрыкин А. А., Бабакова Е. В., Дудихин Д. В. Материалы, используемые в селективном лазерном спекании // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сборник научных трудов XII-ой Международной научно – практической конференции; в 4-х томах, Курск, 19–20 Марта 2015. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2015 – Т. 4 – С. 42–46

10. Дудихин Д. В. Металлические порошки в аддитивных технологиях // Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении: сборник трудов VI Всероссийской научно-практической конференции для студентов и учащейся молодежи, Юрга, 9–11 Апреля 2015. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015 – С. 41–43

11. Saprykin A.A., Saprykina N.A., Dudikhin D.V., Emeljyanenkov S.M. Influence of Layer-by-layer Laser Sintering Modes on the Thickness of Sintered Layer of Cobalt-chromium-molybdenum Powder // Advanced Materials Research. – 2014 – Vol. 1040. – p. 805–808