

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

Институт физики высоких технологий
Направление подготовки (специальность) 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»
Кафедра высоковольтной электрофизики и сильноточной электроники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Генерация низкотемпературной плазмы в системах с полым катодом

УДК 537.525

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ41	Игнатов Данил Юрьевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий ЛПЭЭ, ИСЭ СО РАН	Коваль Н.Н.	д.т.н., профессор		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
	Гаврикова Н.А.	Старший преподаватель		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
	Федорчук Ю.М.	д.т.н., профессор		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
	Ратахин Н.А.	д.ф.-м.н., чл.-кор. РАН		

Томск – 2016 г.

Запланированные результаты обучения по программе.

Код результата	Результаты обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Способность демонстрировать глубокие естественнонаучные, математические и инженерные знания физико-химических и технологических основ получения и использования плотной низкотемпературной плазмы, и применять её для решения научных и инженерных задач наукоёмкого производства на мировом уровне.
P2	Способность планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования по своей специализации с использованием новейших достижений науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта в области знаний соответствующей выполняемой работе, уметь критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делать выводы, использовать основы изобретательства, правовые основы в области интеллектуальной собственности.
P3	Способность интегрировать знания различных и смежных видов деятельности и решать задачи, требующие абстрактного мышления и оригинальности анализа для концептуализации инженерных моделей выбранного технологического оборудования.
P4	Способность оценивать экономическую эффективность новых разработок и их инновационную направленность, выполнять требования по защите окружающей среды .

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

Институт физики высоких технологий
Направление подготовки (специальность) 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»
Кафедра высоковольтной электрофизики и силовоточной электроники

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой ВЭСЭ

(Подпись) _____ Н.А. Ратахин
(Дата)

**ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
4НМ41	Игнатов Данил Юрьевич

Тема работы:

Генерация низкотемпературной плазмы в системах с полым катодом

Утверждена приказом директора

№ 9105/с от 23.12.2014 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:

7.06.2015

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.).

Тлеющий и дуговой разряды, импульсный и постоянный режим, низкотемпературная плазма, ионно-плазменная установка ННВ 6.6-И1, электронно-ионно-плазменная установка АНП-31-600, газовые баллоны с N₂ и Ar, средний вакуум, безопасность работы с электрическими установками, расчёт проекта по разработке ионно-плазменной установки.

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

Обзор литературы по генерации плазмы в дуговом и тлеющем разрядах в самостоятельном и несамостоятельном режимах в больших вакуумных объёмах, и генерации газометаллической плазмы; исследование характеристик плазмы тлеющего несамостоятельного разряда, технологические

выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).	процессы по азотированию металлов в плазме различных разрядов; обсуждение результатов исследования плазмы тлеющего разряда и результатов по азотированию; разработка автоматизированной системы управления для установки по комплексной обработке металлов.
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)	Презентация в форме Microsoft Power Point 2013
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Ст. пр. каф. менеджмента Гаврикова Надежда Александровна
Социальная ответственность	Проф. каф. ЭБЖ ИНК ТПУ Федорчук Юрий Митрофанович
Раздел на немецком языке: финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	23.12.2014
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий ЛПЭЭ, ИСЭ СО РАН	Коваль Николай Николаевич	д.т.н., профессор		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ41	Игнатов Данил Юрьевич		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа состоит из 120 с., 37 рис., 18 табл., 27 источников, 1 прил.

Ключевые слова: тлеющий разряд, дуговой разряд, импульсный режим, несамостоятельный режим, генерация плазмы, низкотемпературная плазма, азотирование, средний вакуум, источники питания разрядов, автоматизация.

Объектом исследования является: низкотемпературная плазма тлеющего несамостоятельного разряда в системе с полым катодом большой площади.

Цель работы исследование основных параметров плазмы для проведения процессов азотирования металлических сплавов.

В процессе исследования проводились измерения характеристик плазмы тлеющего разряда и измерение азотированной поверхности металлических образцов.

В результате исследования были получены основные электротехнические параметры тлеющего разряда и ВАХ зонда, газовых и эмиссионных характеристик.

Основные конструктивные и технологические характеристики вакуумно-плазменной установки ННВ 6.6-И1 внутренние размеры камеры 650×650×650 мм, предельный вакуум $6,5 \cdot 10^{-3}$ Па, мощность до 50 кВт.

Степень внедрения: широкое применение низкотемпературной плазмы в научных исследованиях и промышленности обусловлено простотой её создания и активными свойствами среды, а также широкое использование вакуумно-плазменных технологий в обрабатывающей промышленности.

Область применения: плазмохимические процессы, обработка поверхностей в различных технологических процессах и металлургической промышленности, газовые лазеры, плазменная резка и сварка металлов, термическая обработка и закалка.

Экономическая эффективность/значимость работы: химико-термическая обработка в плазме металлических изделий улучшает эксплуатационные характеристики, тем самым увеличивает срок службы изделий.

В будущем планируется разработка новых систем генерации низкотемпературной плазмы для осуществления процессов по модификации поверхности металлических сплавов.

Определения, обозначения и сокращения, нормативные ссылки.

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

электрический разряд - совокупность процессов, возникающих при протекании электрического тока через вещество, находящееся в газообразном состоянии.

вакуум - пространство, свободное от вещества.

индентор - элемент прибора для измерения твёрдости, вдавливаемый в испытываемый материал.

Обозначения и сокращение, используемые в данной работе:

ТР – тлеющий разряд;

ДР – дуговой разряд;

КП – катодное пятно;

ФН – форвакуумный насос;

ТМН – турбомолекулярный насос;

НВЗ – насос вакуумный золотниковый;

АВЗ – агрегат вакуумной золотниковый;

ДВДР – двухступенчатый вакуумный дуговой разряд;

ПИНК – плазменный источник с накаливаемым катодом;

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ 12.4.154-85 “ССБТ. Устройства экранирующие для защиты от электрических полей промышленной частоты”

2. ГОСТ 12.4.123-83. Средства коллективной защиты от инфракрасных излучений. Общие технические требования.

3. ГОСТ Р 12.1.019-2009. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

4. ГОСТ 12.1.030-81. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление.

5. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования.

ГОСТ 12.2.037-78. Техника пожарная. Требования безопасности

6. ГОСТ 30775-2001 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Классификация, идентификация и кодирование отходов.

7. ГОСТ 12.4.154. Система стандартов безопасности труда. Устройства экранирующие для защиты от электрических полей

Оглавление

Введение	10
Глава 1 Методы генерации низкотемпературной плазмы в больших вакуумных объёмах	13
1.1 Генерация плазмы с использованием самостоятельного тлеющего разряда	13
1.2 Генерация плазмы в несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом	17
1.3 Генерация плазмы в самостоятельном дуговом разряде	20
1.4 Генерация плазмы с помощью двухступенчатого вакуумно-дуговой разряда	22
1.5 Генерация плазмы в несамостоятельном дуговом разряде с комбинированным полым и накали́нным катодом	24
1.6 Генерация смешанной газометаллической плазмы	27
1.7 Обоснование выбора основного направления исследований	31
Глава 2 Описание экспериментальных установок и методик исследования	33
2.1 Модернизированная ионно-плазменная установка ННВ-6.6-И1	33
2.1.1 Вакуумная система	33
2.1.2 Газовая система	34
2.1.3 Генерация плазмы с использованием тлеющего разряда с полым катодом большой площади	35
2.1.4 Генерация плазмы в несамостоятельном дуговом разряде с помощью плазмогенератора «ПИНК»	38
2.2 Аппаратура и методики проведения экспериментальных исследований	39
2.2.1 Методика измерения вольт-амперных характеристик тлеющего разряда	39
2.2.2 Измерение эмиссионных характеристик разряда	40
2.2.3 Измерение газовых характеристик разряда	40
2.2.4 Зондовые измерения характеристик плазмы	40
2.2.5 Методика проведения процессов азотирования титана в плазме несамостоятельного дугового разряда	42
2.2.6 Методика проведения процессов азотирования стали в плазме несамостоятельного тлеющего разряда	43
2.2.7 Методика проведения процессов азотирования стали в плазме несамостоятельного дугового разряда	44
2.2.8 Исследование свойств азотированной поверхности образцов и изделий	45
Глава 5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	49
5.1 Предпроектный анализ	49

5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	49
5.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	50
5.1.3 SWOT-анализ.....	53
5.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации	54
5.2 Инициация проекта.....	55
5.3 Планирование управления научно-техническим проектом.....	57
5.3.1. Иерархическая структура работ проекта.....	57
5.3.2. Контрольные события проекта	58
5.3.3 План проекта.....	59
5.3.4. Бюджет научной разработки	61
Приложение А	69

Введение

Продление эксплуатационных характеристик изделий и изменение свойств металлов и сплавов наиболее актуальная задача в современном мире. Решается данная задача различными способами и наиболее распространённые из них цементация, напыление и азотирование. Цементация стали - это поверхностное диффузионное насыщение малоуглеродистой стали углеродом с целью повышения твёрдости, износоустойчивости. В результате изменения химического состава поверхностного слоя меняется также его фазовый состав и микроструктура. Напыление – это нанесение вещества в дисперсном состоянии на поверхность изделий и полуфабрикатов для сообщения им специальных физико-химических, механических, декоративных свойств или для восстановления дефектной поверхности. Напылённое покрытие удерживается на поверхности в основном силами адгезии. Напыление производится различными методами: газопламенным, газотермическим, детонационным, с оплавлением и плазменным. Азотирование – это технологический процесс, при котором происходит химико-термическая обработка сталей и сплавов, путём насыщения поверхности обрабатываемых материалов атомами азота в азотосодержащей среде. Азотирование на сегодняшний день является важнейшей технологией в различных отраслях машиностроения, целью которого является повышение надёжности и долговечности большого спектра используемых деталей и инструмента. Развитие технологии азотирования начиналось с процессов обработки, проходящих в газах и жидкостях. При газовом азотировании используется аммиак, при работе с которым выдвигаются повышенные требования к безопасности. Кроме того, такие процессы по азотированию являются продолжительными, занимающими порядка десятков часов. При жидкостном азотировании недостатком является токсичность и высокая стоимость цианистых солей, в которых осуществляется обработка изделий.

Сейчас наиболее перспективным методом является ионно-плазменное азотирование. Процессы по обработке проходящие в плазме занимают порядка единиц часов, а используемые в последнее время технологии позволяют исключить токсичные и взрывоопасные вещества, такие как аммиак, из процесса обработки.

Для ионно-плазменного азотирования стоит задача создания однородной плазмы с высокой степенью концентрации. Процесс генерации азотосодержащей плазмы является совокупностью сложных физических процессов, требующих тщательного исследования и измерения для получения ценной, практически важной информации для последующего использования. Получение основных характеристик исследуемой плазмы является основной целью данной работы для проведения экспериментов по азотированию.

В данной работе был произведён сравнительный обзор наиболее распространённых методов плазменной химико-термической обработки поверхности материалов и изделий и на основе этого анализа выбраны два наиболее перспективных метода генерации плазмы. Первый метод - это генерация низкотемпературной плазмы в тлеющем несамостоятельном разряде с полым катодом большой площади, так как использование тлеющего несамостоятельного газового разряда для генерации плазмы при пониженных давлениях в полем катоде позволяет проводить химико-термическую обработку поверхностей металлов и сплавов. В работе изучен эффект полого катода, и его роль в интенсификации генерации плазмы. Несамостоятельный режим горения тлеющего разряда обеспечивался источником электронов на основе дугового разряда с интегрально холодным полым катодом. Вторым методом генерации плазмы являлся метод генерации в дуговом несамостоятельном разряде с использованием плазмогенератора «ПИНК» на основе накаливаемого и полого катода. В процессе выполнения магистерской диссертационной работы оборудование для реализации этих методов было изучено, были произведены сравнительные эксперименты по азотированию в этих двух системах. На основе полученных данных была модернизирована

система генерации плазмы на основе тлеющего разряда с полым катодом с целью повышения эффективности проведения процессов обработки крупногабаритных изделий из стали и проведены предварительные эксперименты.

Глава 1 Методы генерации низкотемпературной плазмы в больших вакуумных объёмах

1.1 Генерация плазмы с использованием самостоятельного тлеющего разряда

Один из первых и наиболее распространённых способов получения низкотемпературной плазмы - это генерация плазмы с помощью самостоятельного тлеющего разряда. Тлеющий разряд – это самостоятельный электрический газовый разряд с холодными электродами, формирующийся, обычно, при низких давлениях и малом токе и имеющий структуру в виде чередующихся светящихся участков различной формы и интенсивности. Характерной чертой данного разряда является значительное падение напряжения вблизи катода, составляющее 100 В и выше, и называемое катодным падением потенциала. Структура тлеющего разряда представлена на рисунке 1.1 [1].

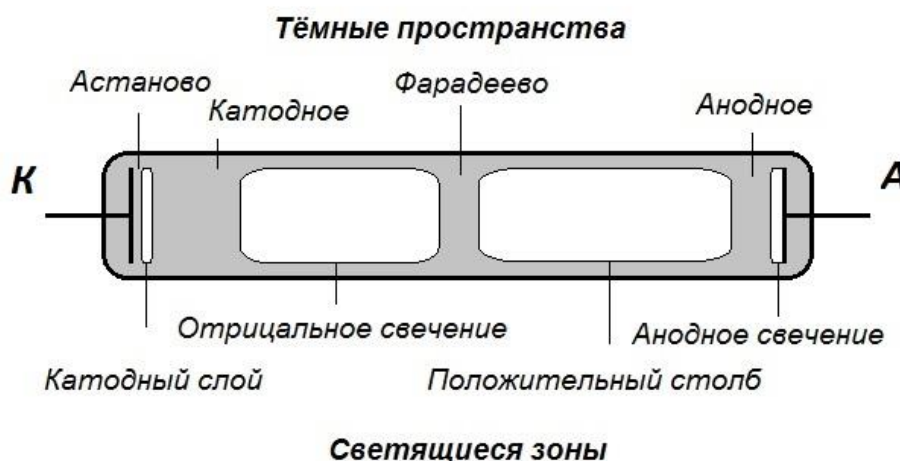


Рисунок 1.1. Структура нормального тлеющего разряда.

Основные процессы, поддерживающие самостоятельный тлеющий разряд, происходят в катодных областях разряда и на поверхности самого катода. Эмиссия электронов из катода обусловлена преимущественно,

бомбардировкой его поверхности положительными ионами, ускоренными в катодных частях разряда. Если сближать анод с катодом, то катодные области будут двигаться вместе с катодом, а анодные области будут уменьшаться, вплоть до их исчезновения. Анодные области являются переходными между положительным столбом разряда и металлическим анодом. В катодных частях разряда преобладает направленное движение заряженных частиц (электронов и ионов), в анодных происходит преимущественно хаотическое движение зарядов [1,8].

Общий характер процессов, происходящих в разряде и обеспечивающих самостоятельное его существование, заключается в следующем. Ионы, ускоренные электрическим полем вблизи катода, быстрые атомы и излучение провоцируют эмиссию электронов из катода, которые, ускоряясь под воздействием электрического поля, приобретают энергию для возбуждения и ионизации атомов. Вновь возникшие электроны, полученные вследствие ионизации атомов газа первичными электронами, дрейфуют в направлении к аноду, а ионы облучают поверхность катода производя дополнительную эмиссию вторичных электронов. Когда первичный электрон, произвёл достаточное количество ионизаций и возбуждений для того, чтобы полученные ионы вместе с быстрыми атомами и излучением обеспечивали эмиссию вторичных электронов с катода, тогда в таком разряде возникает динамическое равновесие между возникающими зарядами и ушедшими на катод или в положительный столб. Такой режим горения разряда называется самостоятельным. Самостоятельный тлеющий разряд используется для генерации низкотемпературной плазмы. Низкотемпературной плазмой называется такая плазма, когда все процессы проходят во внешних электронных оболочках атомов и молекул (ионизация, возбуждение, диссоциация и обратные им процессы). Средняя энергия тепловых движений частиц, при этом, не превышает энергии ионизации: $kT \lesssim e_0 U_i \sim 10 \text{ эв}$, что соответствует $T \lesssim 10^5 \text{ K}$ [1].

Данный метод генерации плазмы широко используется в промышленности для создания активной азотосодержащей среды в больших объёмах [28-30], для проведения процессов азотирования. Пример такой промышленной установки представлен на рисунке 1.2 [2].

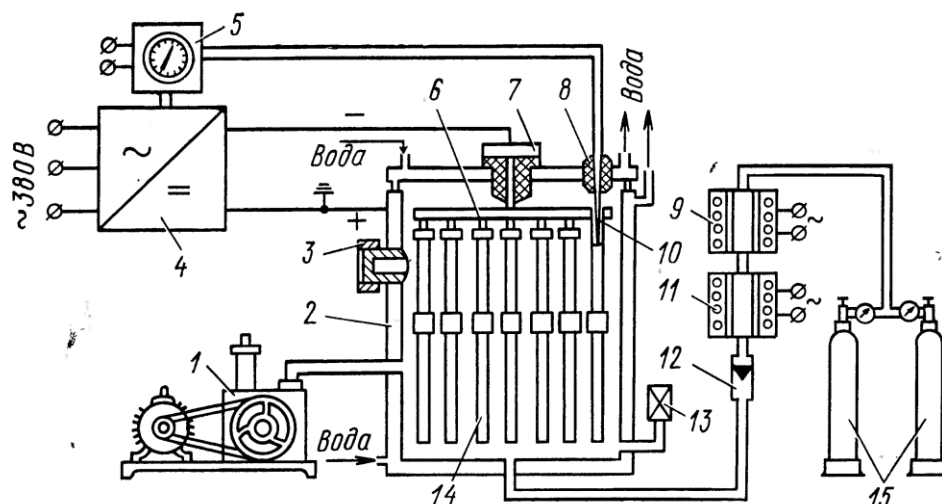


Рисунок 1.2. Принципиальная схема опытно-промышленной установки для ионного азотирования. 1 – вакуумный насос; 2 – рабочая камера; 3 – смотровое окно; 4 – источник электропитания; 5 – электронный потенциометр; 6 – оснастка для загрузки деталей; 7 – токоввод; 8 – термопарный ввод; 9 – фильтр с цеолитом; 10 – термопара; 11 – фильтр с медной стружкой; 12 – ротаметр; 13 – вакуумный датчик; 14 – азотируемые детали; 15 – баллоны с газом.

Мощность такой установки составляет 40 кВт. Обработка деталей 14 происходит в вакуумной камере 2. В начале детали подготавливаются, путём обезжиривания в бензине и закрепляются в держателе деталей 6. Далее камера плотно закрывается и из неё откачивается воздух вакуумным насосом 1 до давления (2-6) Па. После этого подаётся рабочий газ азот из баллонов 15 для продувки рабочего объёма, и установка давления до 13 Па. Для возбуждения тлеющего разряда к катоду, являющимся деталями и аноду 2 (заземлённым стенкам камеры) плавно подаётся напряжение до 1000 В от источника тока 4 с системой дугогашения. Данная система необходима для того, чтобы

предотвращать переход тлеющего разряда в дуговой с образованием катодного пятна, которое оплавляет поверхность деталей. Загрязнения и микронеровности на поверхности способствуют образованию дуг. На первой стадии обработки поверхности металлических изделий в тлеющем разряде осуществляется очистка обрабатываемых деталей путём бомбардировки их поверхности ионами из плазмы, ускоренными в катодном слое. При этом происходит очистка от оксидов и загрязнений и нагрев деталей до заданной температуры. Измерение температуры производится термопарой 10 введённой в отверстие образца. Регистрация температуры и регулировка напряжения осуществляется потенциометром 5. Далее следует вторая стадия процесса – азотирование. Повышается давление газовой среды и сила тока в рабочей камере. При заданной температуре происходит химико-термический процесс диффузии атомов азота в глубь обрабатываемых изделий и их химическая реакция с легирующими элементами. Температура при азотировании играет определяющую роль при формировании модифицированного слоя. Таким образом происходит насыщения поверхности деталей атомами азота. При этом рабочее напряжение в камере составляет 350-550 В. Процессы могут длиться до нескольких десятков часов. По окончании технологической выдержки в плазме тлеющего разряда, производится охлаждение деталей в вакууме или в потоке газа.

При использовании самостоятельного тлеющего разряда генерацию плазмы можно осуществлять в различных объёмах. Современные технологические установки генерации низкотемпературной плазмы в тлеющем разряде достигают объёмов в десятки кубических метров и способны обрабатывать детали массой более 1 тонны [31].

Данный метод генерации плазмы для азотирования имеет недостатки, связанные с высоким давлением, которое составляет порядка сотен Па. При этом давлении, длина свободного пробега иона меньше, чем ширина катодного слоя на ~ 2 порядка при концентрации плазмы – 10^{16} м^{-3} . В следствие этого, ионы сталкиваясь с молекулами рабочего газа в катодном слое,

попадают на обрабатываемую поверхность с энергиями порядка тепловых, и этой энергии становится недостаточно для эффективной ионной очистки, что является причиной увеличения длительности процесса азотирования. Для того чтобы ионная очистка проходила эффективно, необходимо снижать давление, но это приводит к снижению плотности ионного тока на катод. Для повышения плотности ионного тока необходимо значительно повышать напряжения горения разряда, что влечёт за собой повышение энергозатрат и образование катодных пятен на обрабатываемых поверхностях.

1.2 Генерация плазмы в несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом

При рассмотрении генерации плазмы в самостоятельном тлеющем разряде, определяющим фактором горения разряда являлась вторичная электронно-ионная эмиссия, вызванная облучением катода ускоренными ионами. Существование несамостоятельного тлеющего разряда возможно только при наличии дополнительного источника ионизации, например дополнительных электронов в области горения разряда.

В данном методе реализована генерация плазмы в разряде с полым катодом большой площади в несамостоятельном режиме горения разряда. Генерация плазмы производится на экспериментальном стенде, основой которого является промышленная ионно-плазменная установка ННВ-6.6-И1 (рис. 1.3) [5].

Горение разряда происходит между полым катодом 3, являющимся внутренними стенками вакуумной камеры объёмом $2,3 \cdot 10^4 \text{ см}^3$ и трубчатым водоохлаждаемым анодом 1, площадью 150 см^2 . Электропитание несамостоятельного тлеющего разряда осуществляется от источника с тиристорной регулировкой тока в первичной обмотке трехфазного трансформатора. Источник питания оснащен электронной системой защиты, предотвращающей появление микродуг на поверхности катода тлеющего

разряда. Откачка из камеры производится турбомолекулярным насосом ТМН-500 до давления 10^{-3} Па. Регулировка рабочего давления происходит в диапазоне от 0,3-1 Па за счёт напуска рабочего газа – азота.

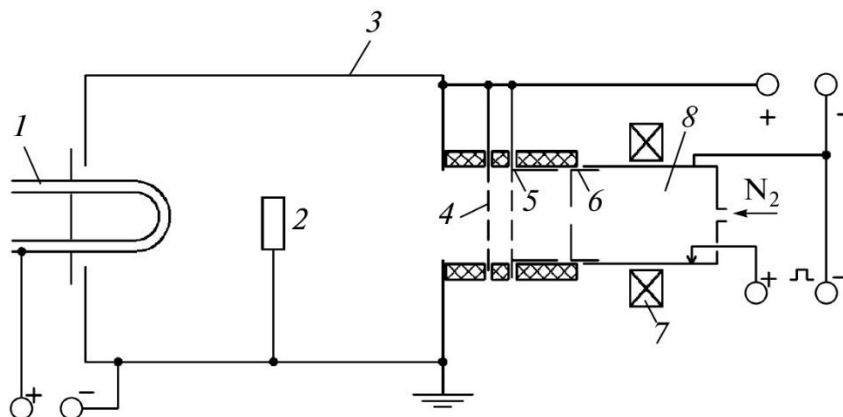


Рисунок. 1.3. Принципиальная схема экспериментального стенда.

1 – охлаждаемый водой анод тлеющего разряда; 2 – обрабатываемые образцы; 3 – вакуумная камера – полый катод тлеющего разряда; 4 – сетка;
5 – сетчатый полый анод дугового разряда; 6 – диафрагма;
7 – магнитная катушка; 8 – вспомогательный поджигающий электрод дугового разряда.

Особенностью данного способа генерации плазмы в несамостоятельном тлеющем разряде является использование эффекта полого катода. Электроны, эмитируемые при бомбардировке ионами стенок камеры, а также быстрые электроны, образованные в катодном слое разряда, десятки и сотни раз отражаются от стенок. Камера является для них электростатической ловушкой, и до попадания на поверхность анода или электрода на плавающем потенциале они проходят внутри нее путь, превышающий ее размеры в десятки и сотни раз. Каждый из этих электронов успевает побывать во всех частях камеры, и поэтому вероятность ионизации ими газа распределена по объему камеры достаточно однородно. Это обеспечивает высокую однородность плазмы [6].

В целях устойчивого горения несамостоятельного тлеющего разряда при низких давлениях и напряжениях, а также облегчения его зажигания, используется источник электронов на основе дугового разряда с интегрально холодным полым катодом [3,4]. Конструкция источника электронов представляет собой полый водоохлаждаемый катод 8, на внутренней поверхности которого, с помощью устройства поджига инициируется катодное пятно. Катодное пятно удерживается на заданном участке катода за счет арочного магнитного поля, создаваемого магнитной катушкой 7. Для предотвращения выхода катодного пятна с рабочей поверхности катода (внутренней его образующей) источник оборудован торцевым фланцем и диафрагмой 6 с диаметром отверстия 50 мм, которые находятся под плавающим потенциалом. Особенностью конструкции является то, что ионы и макрочастицы металла, вылетающие из катодного пятна, осаждаются на противоположные стенки полого катода 8, уменьшая его расход, а электроны, осциллируя внутри полого катода, производят ионизацию рабочего газа, подаваемого через газовый ввод расположенный на торцевом фланце плазмогенератора. Электропитание дугового разряда плазмогенератора осуществляется от сварочного выпрямителя ВД-201, обеспечивающего ток до 200 А при напряжении ~ 30 В. Газовая плазма заполняет полый катод и полый анод с мелкоструктурированной ($0,4 \times 0,4$ мм) сеткой 5, через которую производится эмиссия электронов в область основного разряда. Сетка является анодом вспомогательного разряда и находится под потенциалом катода основного разряда. Это позволяет проникать электронам из плазмы дугового разряда в плазму несамостоятельного тлеющего разряда сквозь сетку, будучи ускоренными в катодном слое, и произвести дополнительную ионизацию плазмы тлеющего разряда. Такая система позволяет управлять током основного разряда, без изменения его напряжения, это приводит к изменению плотности тока на катод которое определяет температуру обрабатываемых образцов 2, находящихся под потенциалом катода тлеющего разряда. В экспериментах по азотированию этот параметр является

определяющим. В случае самостоятельного разряда при увеличении напряжения, для повышения температуры мы бы увеличивали энергию ионов, ускоренных на катод в катодном слое, это приводит к травлению и распылению поверхности обрабатываемых образцов и увеличению шероховатости.

Для эффективной очистки азотируемых деталей при низких давлениях необходимая энергия ионов ≥ 150 эВ достигается снижением эффективности извлечения электронов из плазмы дугового разряда путём ввода в систему дополнительной сетки 4. Сетка с геометрической прозрачностью $\approx 65\%$ находится на расстоянии 1 см от основной сетки 5 и создаёт эквипотенциальный зазор с меньшей плотностью плазмы чем в полном аноде 5. Это приводит к возможности увеличения напряжения в катодном слое несамостоятельного тлеющего разряда за счёт снижения тока эмитированных электронов, при снижении эффективности извлечения электронов и плазмы дугового вспомогательного разряда.

Недостатком данной системы является невыполнимость 100%-ой сепарации продуктов эрозии полого катода дугового источника электронов, которые частично оседают на обрабатываемой поверхности в несамостоятельном тлеющем разряде. Вторым недостатком данного метода является нагрев стенок камеры вследствие особенности горения такого разряда, это требует отвода значительной части энергии водоохлаждающей системой. Данный процесс невыгоден с позиции энергоэффективности и заставляет искать пути решения данной проблемы.

1.3 Генерация плазмы в самостоятельном дуговом разряде

Самостоятельные разряды, у которых катодное падение потенциала соответствует по порядку величины потенциалу ионизации ионов (порядка 10 эВ) или возбуждению атомов, называются дуговым. В межэлектродном промежутке дугового разряда наблюдается неравномерное распределение

электрического поля, состоящее из трёх зон (рис.1.4) [7]: катодной, анодной и столба дуги.

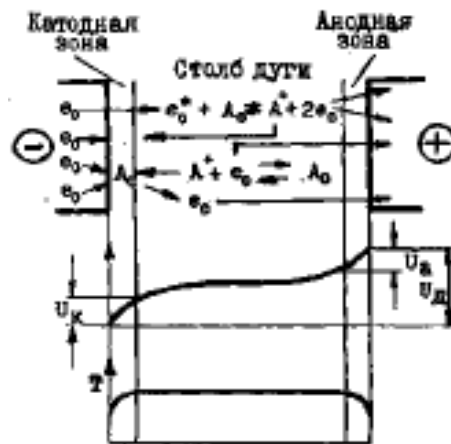


Рисунок 1.4. Структура дугового разряда.

Скачки потенциала U_k и U_a обусловлены скоплениями пространственных зарядов и повышенным сопротивлением этих зон по сравнению со столбом. Столб дуги представляет собой плазму с локальным термодинамическим равновесием, квазинейтральностью и свойствами идеального газа. Однако в столбе вакуумных дуг и дуг при низком давлении термодинамическое равновесие может не соблюдаться. Приэлектродные зоны — катодная и анодная — являются переходными областями между твёрдыми (или жидкими) поверхностями электродов и плазмой разряда. Причём преобладают процессы термоэлектронной, автоэлектронной и термоавтоэлектронной эмиссии. Получая из разряда большое количество энергии, катоды локально перегреваются и испаряются, поэтому дуговые разряды, как правило, горят в парах испарённого металла, особенно при низких давлениях, что позволяет использовать их для нанесения покрытий.

Дуговым разрядам характерны большие токи ($i \sim 1 - 10^5$ А), превышающие токи тлеющего разряда и высокие плотности тока на катоде при $j_k \sim 10^2 - 10^4$ А/см² — в одних формах дуговых разрядов, и при $j_k \sim 10^4 - 10^7$

A/cm^2 – в других. Напряжение горения дуги низкое и не превышает 20 - 50 В, в некоторых формах - всего несколько вольт [8].

Дуговой самостоятельный разряд успешно используется для создания низкотемпературной плазмы при низких давлениях для различных вакуумно-плазменных процессов, таких, как вакуумный нагрев изделий электронами, плазмохимическая обработка, ионная очистка поверхности, но основным – нанесение покрытий.

В случае когда требуется получение газовой плазмы без примесей, недостатком данного метода, является интенсивное каплеобразование и испарение вследствие локального перегрева поверхности катода (эрозия катода), что приводит к появлению в плазме частиц материала катода. В вакуумно-плазменных процессах по нанесению покрытий эрозия катода используется для распыления материала и нанесения его на обрабатываемую поверхность.

1.4 Генерация плазмы с помощью двухступенчатого вакуумно-дуговой разряда

Одним из способов генерации газовой плазмы, является генерация плазмы с помощью двухступенчатого вакуумно-дугового разряда (ДВДР) [9,10] в широком диапазоне давлений (0,01 – 10 Па). Такой разряд включает в одном вакуумном объёме две физически разнородные области (ступени): газометаллическая плазма вблизи катода и газовая плазма (плазма рабочего газа) вблизи анода. Иначе говоря, разрядный промежуток такого разряда разделён на две части: первая часть представляет собой вакуумную дугу с холодным катодом, вторая – дуговой разряд в плазме рабочего газа низкого давления. На рисунке 1.5 представлена конструктивная схема установки генерации плазмы в ДВДР для обработки изделий [11].

Вакуумная камера 10 откачивается высоковакуумной системой откачки до давления $1 \cdot 10^{-3}$ Па, а затем в камеру производят напуск азота до

давления $1 \cdot 10^{-1}$ Па. Между катодом 1 и изделиями 3 зажигается двухступенчатый вакуумно-дуговой разряд. Для возбуждения дугового разряда ключ 6, соединяющий положительный полюс источника питания 4 с изделиями 3 и анодом 7, переводится в положение "а". Дуговой разряд формируется в катодное пятно 5 на поверхности катода. Автоматическая система управления движением катодного пятна (триггер) 15, электрически связана с датчиками крайнего положения катодного пятна 12 и управляет ключами 9.

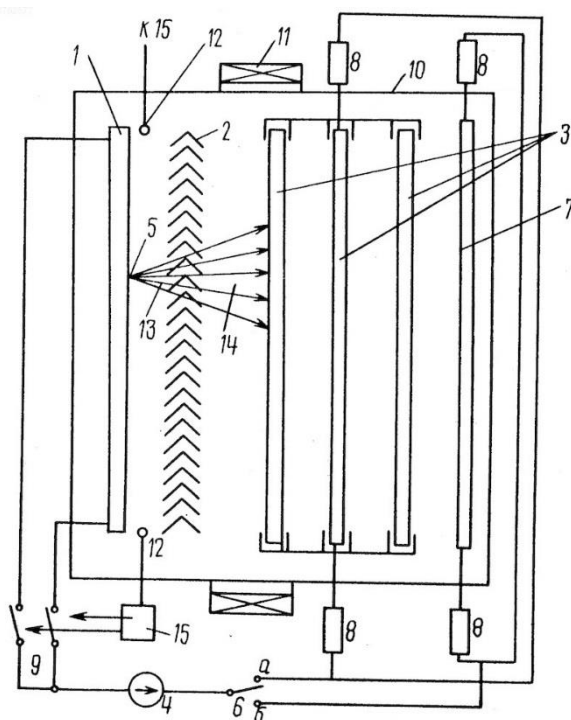


Рисунок 1.5. Схема установки по обработки изделий в плазме двухступенчатого вакуумно-дугового разряда. 1 – линейный катод; 2 – оптически непрозрачное приспособление(шеврон); 3 – обрабатываемые детали; 4 – источник питания дугового разряда; 5 – катодное пятно; 6 – двухпозиционный ключ; 7 – анод дугового разряда; 8 – выравнивающие резисторы; 9 – ключи токоподвода к катоду; 10 – вакуумная камера; 11 – соленоид; 12 – датчики крайнего расположения катодного пятна; 13 – столб газометаллической плазмы; 14 – столб газовой плазмы; 15 – блок управления перемещения катодного пятна.

Газометаллическая плазма 13, образованная горением дугового разряда в рабочем газе и испарённого материала катода отделяется шевроном 2 от газовой плазмы 14, который пропускает в рабочую часть камеры только электроны и газ и задерживающий ионы и атомы испаряемого материала. Под воздействием электрического поля анода газ в пространстве между экраном и анодом-изделием ионизируется, образуя движущийся совместно с катодным пятном столб плазмы 14. Привязка этого столба к положению катодного пятна осуществляется включением соленоида 11, осуществляющего движение электронного потока вдоль силовых линий магнитного поля. При равномерном сканировании катодного пятна вдоль катода осуществляется равномерный прогрев поверхности изделий, совершающих планетарное вращение. Когда температура изделий достигнет рабочей, система регулирования температуры переключит ключ 6 из положения "а" в положение "б", и разряд переходит с изделия на анод. При этом изделие при рабочей температуре находится в азотной плазме одной и той же интенсивности вне зависимости положения ключа "а" и "б". Поэтому процесс регулирования температуры не приводит к снижению интенсивности процесса азотирования. Наличие у анода 2-х токоподводов обеспечивает однородность движения потока газовой плазмы относительно изделия.

Недостатком данной системы является неосуществимость независимой регулировка параметров разрядов в первой и второй ступенях в следствии равенства токов этих разрядов из-за одного общего источника питания. Вторым недостатком является то, что в первой ступени происходит расход материала катода и оседания его на шевроне, а также на стенках камеры, что приводит к необходимости периодической очистки этих поверхностей.

1.5 Генерация плазмы в несамостоятельном дуговом разряде с комбинированным полым и накаливаемым катодом

Данный метод генерации низкотемпературной плазмы осуществляется в дуговом несамостоятельном разряде за счёт термоэлектронной эмиссии с накали́нного катода, который разогревается от дополнительного источника питания. Сам разряд практически не разогревает накали́нный катод. Только в случае больших плотностей тока разогрев может стать существенным, что в результате заставит разряд перейти в самостоятельный режим. Электроны, выпускаемые в следствии термоэлектронной эмиссии способствуют зажиганию и поддерживают горения разряда. Практически всё напряжение разряда приходится на область вблизи катода, которое оказывается близким к потенциалу ионизации газа, а остальная область заполняется светящейся плазмой и достигает потенциала близкого к потенциалу анода. Электроны, покинувшие катод в следствии термоэлектронной эмиссии, создают нескомпенсированный отрицательный заряд вблизи катода, в котором происходит падение потенциала, ускоряющее электроны, которые производят ионизацию газа, образуя плазму. Образовавшиеся ионы в необходимом количестве для поддержания стационарного режима разряда поступают на катод и частично рассеивают отрицательный заряд, образованный термоэлектронами вблизи катода, уменьшая толщину катодного слоя и увеличивая, тем самым, напряжённость электрического поля в слое. Данный процесс обеспечивает высокий разрядный ток несамостоятельного дугового разряда [1].

На этом принципе реализована система генерации низкотемпературной плазмы в несамостоятельном дуговом разряде с плазменным источником с комбинированным накали́нным и полым катодом «ПИНК» для различных технологических процессов при низких давлениях, в частности для нанесения упрочняющих и декоративных покрытий, азотирования, создания плотной плазмы вблизи напыляемой поверхности для финишной очистки, активации поверхности перед напылением (рис. 1.6) [12,13].

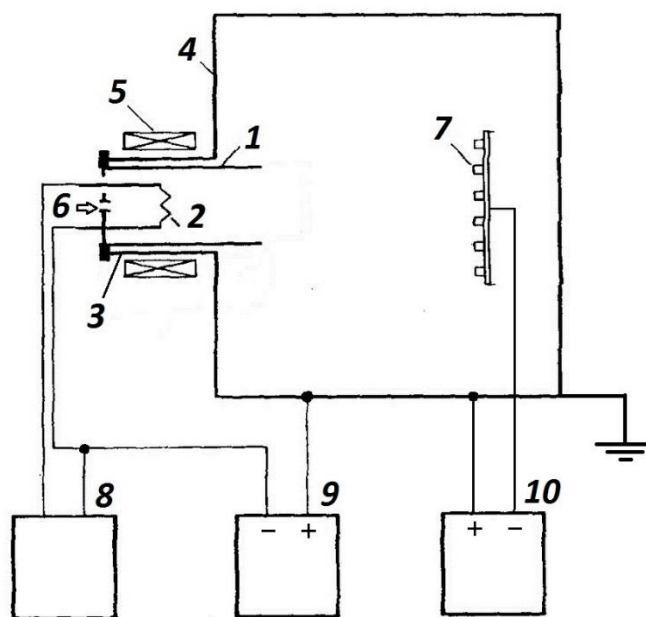


Рисунок 1.6. Схема установки генерации плазмы в несамостоятельном дуговом разряде. 1 – цилиндрический полый катод; 2 – накали́нный катод; 3 – корпус плазмогенератора; 4 – полый анод дугового разряда; 5 – магнитная катушка; 6 – отверстие для подачи газа; 7 - обрабатываемые детали; 8 – блок питания накального катода; 9 – блок питания дугового разряда; 10 – источник отрицательного смещения на подложку.

Плазмогенератор «ПИНК» состоит из полого катода 1 (длиной $L = 350$ мм, диаметром $D = 90$ мм), электрически соединенного с одним из концов термо катода 2, размещенного внутри полого катода. Цилиндрический корпус 3, электрически соединенного с вакуумной камерой-анодом 4. Рабочее давление в области обработки деталей (рабочей камере) варьируется в пределах (0.1 - 2) Па. В рабочей камере размещены обрабатываемые детали 7, на которые подаётся отрицательное электрическое смещение источником 10. Электрическое питание плазмогенератора осуществляется от блока питания накала 8, блок питания разряда 9 обеспечивает ток основного разряда. При включении катушки и установки рабочего давления подаётся напряжения на электроды разрядной системы плазмогенератора. Электроны, эмитируемые накали́нным катодом, ионизируют рабочий газ. Вследствие провисания

потенциала в полость 1, возникает эффект полого катода, состоящий в образовании катодного падения потенциала у внутренних стенок катодной полости. Электроны, отражаясь от потенциального барьера, совершают колебательные движения в полости, а внешнее магнитное поле заворачивает электроны удлиняя траекторию движения, тем самым достигается высокая эффективность ионизации газа. Изменяя ток накала и, таким образом, эмиссию электронов с термокатада, можно регулировать ток разряда и реализовать несамостоятельный дуговой разряд без катодного пятна с током десятки – сотни ампер при напряжениях горения разряда в несколько десятков вольт [14]. Ионы, ускоренные в пристеночном слое, бомбардируют поверхность внутренних стенок катодной полости, вызывая эмиссию вторичных электронов, которые увеличивают ионизацию газа. Расширяющаяся плазма создает условия для зажигания несамостоятельного дугового разряда между полым и накаливаемым катодами и стенками вакуумной камеры, которая является полым анодом. Таким образом, камера заполняется достаточно однородной плазмой. Азотирование проводится при постоянном смещении напряжения на обрабатываемые детали (200 – 1000) В от блока питания 10, которое определяет температуру деталей.

Недостатком данного метода является наличие дополнительного источника отрицательного смещения, которое усложняет систему. Вторым недостатком является ограниченная работа вольфрамового катода, составляющая единицы часов.

1.6 Генерация смешанной газометаллической плазмы

Вакуумно-дуговые методы позволяют осуществлять генерацию металлической плазмы путём термического испарения материала катода с помощью нагрева его в катодном пятне дугового разряда до температуры испарения. На этом принципе основана работа вакуумно-дугового испарителя, являющимся генератором металлической плазмы. Испаряемый катод может

состоять из различных металлов. Испарение вещества происходит, когда с повышением температуры средняя колебательная температура его частиц возрастает настолько, что становится выше энергии связи с другими частицами, и они покидают поверхность. В результате испарения или сублимации вещества переходят в паровую фазу. На рисунке 1.7 представлена конструкция вакуумно-дугового испарителя с магнитным удержанием катодного пятна (КП) [7].

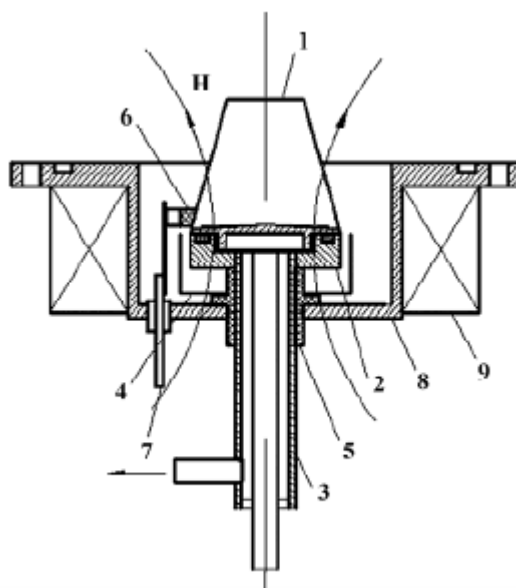


Рисунок 1.7. Вакуумно-дуговой испаритель с магнитным удержанием КП на испаряемой поверхности катода. 1 – катод; 2 – основание;

3 – токоподвод катода; 4 – изолированный экран; 5 – изолятор токоподвода; 6 – керамическая вставка поджигающего устройства;

7 – токоподвод поджигающего устройства; 8 – корпус катодного узла; 9 – соленоид.

Удержание КП на испаряемой поверхности катода с помощью магнитного поля основано на свойстве КП смещаться в направлении острого угла, образованного силовыми линиями магнитного поля с этой поверхностью. Индуктивность магнитного поля составляет 10-20 мТл. Катод 1 в виде усечённого конуса установлен внутри корпуса 8. Снаружи корпуса размещён соленоид 9, основной функцией которого является выталкивание

КП с боковой поверхности катода на испаряемую. Катод у основания охвачен изолированным экраном 4, способствующим погасанию катодных пятен в случаях их перехода на поверхность основания 2, что возможно при недостаточном уплотнении катода (течи) или наличии на нём загрязнений. Токоподвод 3 дугового разряда совмещён с системой водяного охлаждения катода. Поджигающее устройство состоит из керамической вставки 6, прижатой к катоду пластиной, связанной через токоподвод 7 с генератором поджигающих импульсов.

Вакуумно-дуговой метод успешно используется для генерации металлической плазмы с целью модификации поверхностного слоя материалов и изделий, а также для синтеза функциональных покрытий. С помощью дугового испарителя происходит генерация металлической плазмы, затем её конденсация на обрабатываемую поверхность, а при наличии в камере молекулярного газа – нитридных, карбидных, оксидных или других покрытий с более сложным составом. На основе данного метода разработана установка для модификации поверхностного слоя материалов и изделий с использованием источников газоразрядной и металлической плазмы (рис. 1.8) [15].

Установка оборудована плазменным источником «ПИНК» 7 и двумя дуговыми испарителями 2. Обрабатываемые детали 5 устанавливаются на стол с планетарным вращением, на который возможно подавать отрицательное напряжение смещения до 1 кВ от источника 6. Использование различных плазменных источников позволяет проводить комплексные процессы обработки металлических поверхностей в плазме дуговых разрядов в едином вакуумном цикле. В плазме инертных газов возможны такие процессы как очистка, нагрев и активация поверхности. В дуговых разрядах низкого давления возможно проводить процессы по азотированию и оксидированию. В металлической плазме возможно напыление различных покрытий.

В случае вакуумно-дугового осаждения с плазменным ассистированием на первом этапе используется плазма аргона низкого

давления ($n \sim 10^9 - 10^{11} \text{ см}^{-3}$) на основе несамостоятельного дугового разряда. С помощью ионов рабочего газа с энергией в интервале $\sim (100 - 1000) \text{ эВ}$ эффективно проводится очистка поверхности от оксидных пленок, диэлектрических включений и адсорбированных газов. На втором этапе производится нанесение вспомогательного подслоя ($h \sim 100 \text{ нм}$) для увеличения адгезии основного покрытия с подложкой. На третьем этапе -

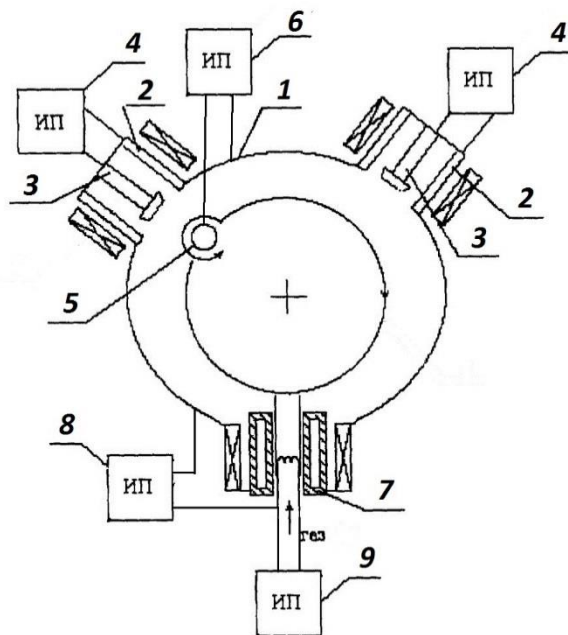


Рисунок 1.8. Схема экспериментальной установки. 1 – вакуумная камера; 2 – цилиндрический корпус дугового испарителя; 3 – катод испарителя; 4 – источник питания дугового испарителя; 5 – обрабатываемые детали; 6 – источник питания дополнительного отрицательного смещения деталей; 7 – плазмогенератор «ПИНК»; 8 – источник питания дугового несамостоятельного разряда; 9 – источник питания накаливаемого катода.

непосредственно синтез основного покрытия (3-5 мкм) при испарении материала катода 3 в катодном пятне дугового разряда. Синтез покрытий вакуумно-дуговым методом на втором и третьем этапах осуществляется в режиме плазменного ассистирования при относительно низком давлении ($\sim 0.1 \text{ Па}$), т.е. конденсация покрытий происходит из смешанной газометаллической

плазмы ($n \sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$). При этом формируется покрытие плотной структуры (без внедрения атомов газа), а непрерывная бомбардировка растущего покрытия низкоэнергетическими ионами рабочего газа позволяет удалять с поверхности адсорбированный газ и измельчать структуру растущего покрытия [16].

1.7 Обоснование выбора основного направления исследований

Проведённый анализ, показывает, что:

В самостоятельном тлеющем разряде, несмотря на простоту системы с одним источником питания и с невысоким требованием к глубине вакуума, всё же остаётся проблематичной эффективная ионная очистка, что приводит к необходимости добавлять в рабочую газовую смесь водорода, или производить азотирование с использованием диссоциированного аммиака.

Дуговой самостоятельный разряд имеет недостатки, вызванные в следствии попадания материала катода в генерируемую плазму и тем самым осаждая её на стенки и обрабатываемые материалы.

Недостатком двухступенчатого дугового разряда является невозможность регулировки по отдельности в первой и второй ступенях разряда из-за общего источника питания. Так же при реализации этого метода расходуетсся катод, и продукты эрозии осаждаются на стенках вакуумно-дуговой камеры и на жалюзи.

Несамостоятельный дуговой разряд лишён недостатков выше перечисленных способов генерации плазмы, он имеет независимую регулировку различных параметров разряда и отсутствуют процессы, связанные с эрозией катода. Данная разрядная система оснащена дополнительным источником напряжения отрицательного смещения, что позволяет производить эффективную очистку поверхности обрабатываемых изделий. Кроме того, использование систем с комбинированным накаливаемым и полым катодом позволяет осуществлять генерацию газовой плазмы

одновременно с генерацией металлической плазмы, реализуя при этом генерацию смешанной газометаллической плазмы, которая позволяет производить большой комплекс ионно-плазменных процессов, в едином вакуумном цикле и является целью исследований в перспективе.

Однако недостатком данного метода является неоднородность генерируемой плазмы по объёму, что заставляет применять в данной системе дополнительный механизм вращения обрабатываемых изделий [26], что усложняет обработку крупногабаритных изделий. Исследование данного метода генерации газовой и газометаллической плазмы в текущей работе носит дополнительный характер.

Несамостоятельный тлеющий разряд с полым катодом большой площади является перспективным для исследования методом генерации плазмы. Такая система позволяет проводить ионно-плазменные процессы, азотирования, без использования механизмов вращения обрабатываемых деталей за счёт хорошей однородности плазмы во всём объёме полого катода.

Инжекция дополнительных электронов из вспомогательного разряда позволяет регулировать температуру обрабатываемых деталей без изменения напряжения горения разряда. Однако особенность горения такого разряда, когда основная энергия выделяется на водоохлаждаемых стенках, заставляет искать пути снижения мощности, затрачиваемой на нагрев и поддержание температуры крупногабаритных деталей с большой площадью поверхности.

Глава 2 Описание экспериментальных установок и методик исследования

2.1 Модернизированная ионно-плазменная установка ННВ-6.6-И1

2.1.1 Вакуумная система

Вакуумно-плазменная установка ННВ-6.6-И1 оборудована вакуумной системой которая обеспечивает откачку газа из рабочей камеры для создания разряжённой среды до предельного значения давления $3,5 \cdot 10^{-3}$ Па.

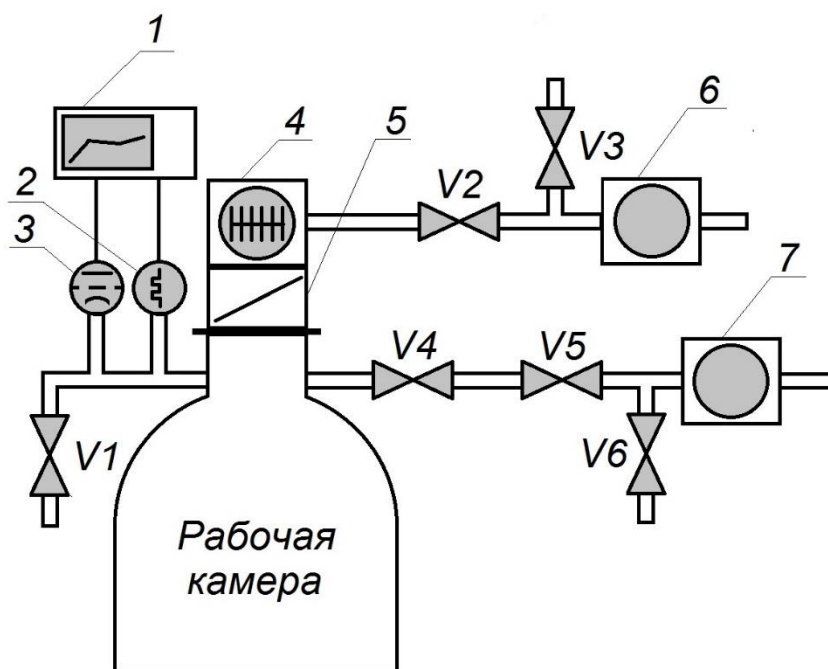


Рисунок 2.1. Схема вакуумной системы. 1 – вакуумметр Мерадат-ВИТ19ИТ2; 2 – датчик давления ПМТ-2; 3 – датчик давления ПМИ-10-2; 4 – турбомолекулярный насос ТМН-500; 5 – затвор; 6 – форвакуумный насос АВЗ-20Д; 7 – насос НВЗ-150; V1-V6 – вакуумные клапаны.

На представленной установке реализована двухступенчатая система откачки. Непосредственно из камеры, начиная с форвакуумного диапазона давления, ведётся откачка турбомолекулярным насосом 4; с выхода ТМНа газ откачивается насосом золотникового типа 6. Перед тем, как начать

высоковакуумную откачку ТМНом, в рабочей камере создается предварительное разрежение насосом 7.

Измерение давления производится вакуумметром 1 термпарным датчиком 2 и ионизационным 3 в соответствующих магистралях вакуумной системы.

2.1.2 Газовая система

Система газового питания (рис.2.2) служит для напуска рабочего газа в камеру и поддержания его давления в течение техпроцесса.

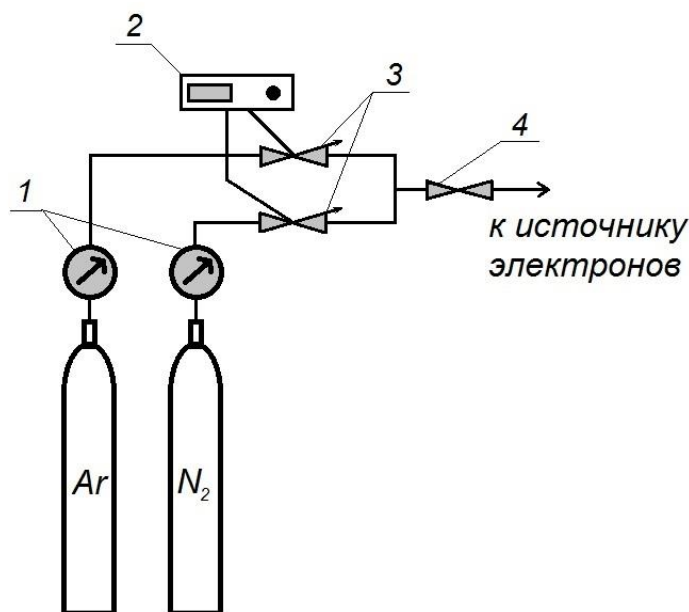


Рисунок 2.2. Система газового питания. 1 – редуктор; 2 – блок управления, индикации и питания (БУИП-3); 3 – регулятор расхода газа (РРГ-10); 4 – общий клапан.

В состав системы входят два газовых баллона с аргоном и азотом. Давление на выходе редукторов 1 устанавливается $0,5 \text{ кгс/см}^2$. Подача газа к источнику электронов и регулировка давления осуществляется с помощью натекателей 3 и блока управления 2.

2.1.3 Генерация плазмы с использованием тлеющего разряда с полым катодом большой площади

Исследования проводились на модернизированной ионно-плазменной установке ННВ-6.6-И1, схема установки представлена на рисунке 2.3.

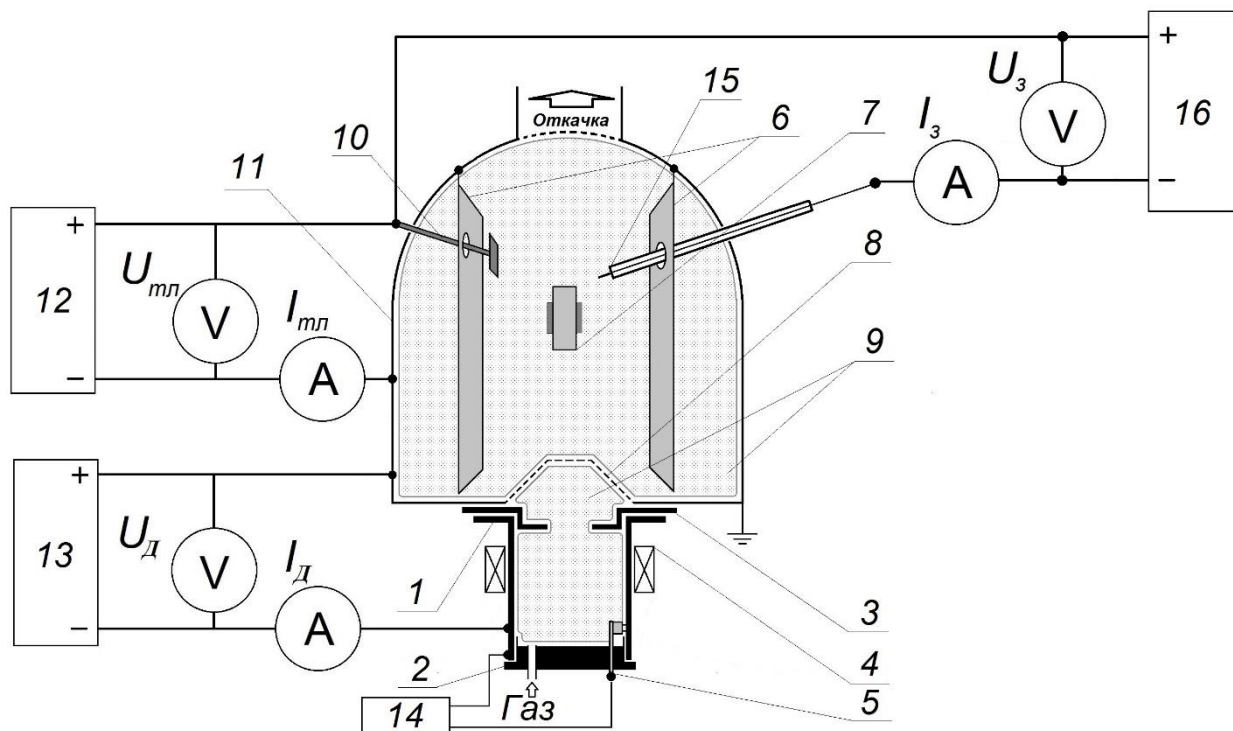


Рисунок 2.3. Схема экспериментальной установки для генерации плазмы в несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом. 1 – полый катод дугового разряда; 2 – торцевой фланец источника электронов; 3 – диафрагма; 4 – магнитная катушка; 5 – поджигающий электрод; 6 – тепловые экраны; 7 – держатель образцов; 8 – эмиссионная сетка; 9 – плазма; 10 – анод тлеющего разряда; 11 – полый катод (вакуумная камера); 12 – блок питания тлеющего разряда; 13 – блок питания дугового разряда; 14 – блок питания поджига; 15 – зонд Ленгмюра; 16 – автоматизированная система снятия зондовых характеристик; U_3 – потенциал зонда относительно анода; I_3 – ток зонда; $U_{тл}$ – напряжение тлеющего разряда; $I_{тл}$ – ток тлеющего разряда; U_d – напряжение дугового разряда; I_d – ток дугового разряда.

Генерация плазмы осуществлялась в тлеющем разряде с полым катодом большой площади в несамостоятельном режиме (с использованием инжекции дополнительных электронов в полый катод). Для облегчения зажигания разряда и обеспечения требуемой плотности ионного тока при напряжениях горения до 300 В в полый катод производится инжекция электронов из источник дополнительных электронов [3,4,32-34].

Принцип работы данной системы генерации плазмы подробно описан в аналогичной системе в пункте 1.2 и полностью соответствует ей. Отличительной особенностью модернизированной системы является изменённая форма эмиссионной сетки 8 с геометрической прозрачностью $\approx 30\%$. Сетка закреплена на специальном эмиссионном электроде, придающем ей форму усеченного конуса с диаметром основания 250 мм. Сделана это было с целью достижения однородности концентрации плазмы, за счёт равномерного распределения по объёму эмитированных электронов, ускоренных в катодном слое, начальная траектория которых перпендикулярно плоскости касательной к сетки.

Второй отличительной особенностью в данной системе является использование тепловых экранов 6, для экономии потребляемой энергии на нагрев деталей в процессах по азотированию. Принцип действия теплового экрана заключается в использовании частично отраженной и переизлученной лучистой энергии с разогретых экранов на нагрев образцов. При горении разряда происходит нагрев теплового экрана и детали, являющимися катодом разряда в данной системе. Часть лучистой энергии, выделяемой экраном, отражаясь и излучаясь с внутренней поверхности экрана, подогревает обрабатываемые образцы. В случае, когда экран отсутствует, практически вся энергия, поглощаемая стенками камеры, уносится из системы охлаждающей водой. За счёт отражения и переизлучения лучистой энергии с увеличением количества тепловых экранов, достигается экономия энергии, затрачиваемой на нагрев образцов на десятки процентов [25]. Это приводит к снижению плотности ионного тока, необходимой для поддержания заданной

температуры, что, в свою очередь, приводит к снижению эффективности азотирования. На основе предыдущих исследований, была предложена система, которая обеспечивает частичное экранирование обрабатываемых деталей. Тепловые экраны при этом помещаются внутри камеры вдоль оси источника электронов. Использование частичного экранирования детали позволяет соблюдать баланс между экономией электроэнергии и приемлемой плотностью ионного тока, что позволяет сохранять эффективность азотирования поверхностей металлов.

Электропитание основного тлеющего разряда осуществляется от источника 12 с стабилизацией по напряжению и с возможностью работы как в постоянном режиме, так и в импульсном. Диапазон регулировки частоты выходных импульсов напряжения отрицательной полярности составляет 1-10 кГц с дискретностью 1 кГц и с регулировкой коэффициента заполнения выходных импульсов 1-99% с дискретностью 1%. Диапазон регулировки выходного рабочего напряжения 10-300 В с дискретностью 1 В и с максимальным средним током в нагрузке 150 А. Источник оснащён цифровой системой защиты, предотвращающей появление и функционирование микродуг на поверхности полого катода. Выходная средняя мощность источника электропитания не более 30 кВт.

Электропитание вспомогательного дугового разряда осуществляется от источника тока 13, обеспечивающим ток разряда от 10 А до 150 А и рабочим напряжением ~60 В и напряжении холостого хода 150 В. Источник работает в режиме стабилизации по току, который задаётся с помощью ручки регулировки и отображается на мониторе передней панели.

2.1.4 Генерация плазмы в несамостоятельном дуговом разряде с помощью плазмогенератора «ПИНК»

Генерация плазмы с помощью дугового несамостоятельного разряда осуществлялось на установке ННВ-6,6-И1 (рис.2.4) [35,36] с использованием генератора плазмы «ПИНК» - плазменный источник с комбинированным накали́нным и полым катодом [12, 13].

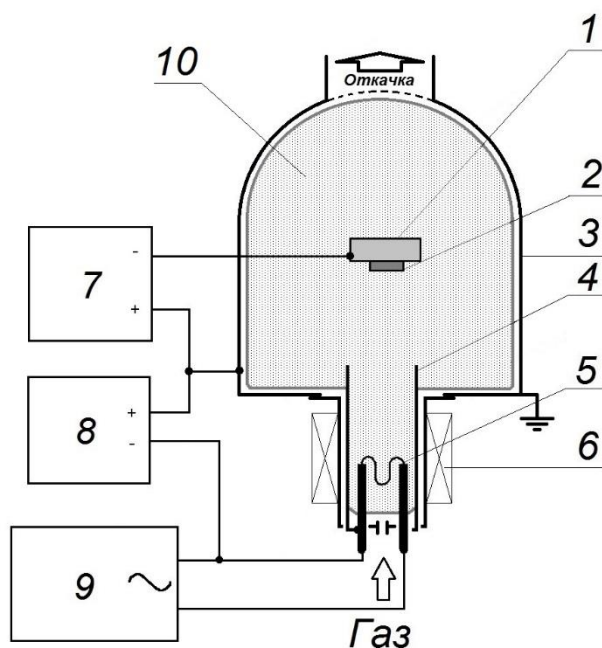


Рисунок 2.4. Схема экспериментальной установки для генерации плазмы в несамостоятельном дуговом разряде с использованием плазмогенератора «ПИНК». 1 – держатель образцов; 2 – обрабатываемый образец; 3 – камера (полый анод дугового разряда); 4 – цилиндрический полый катод; 5 – накали́нный катод; 6 – магнитная катушка; 7 – источник отрицательного смещения образцов; 8 – блок питания дугового разряда; 9 – блок питания накали́нного катода; 10 – плазма дугового разряда.

Принцип работы данной системы генерации плазмы подробно описан в аналогичной системе в пункте 1.5.

Электрическое питание накаливаемого катода плазмогенератора осуществляется от блока питания накала 9, обеспечивающего переменный ток до 200 А при напряжении до 12 В. Питание основного разряда происходит от блока питания 8, обеспечивающего ток разряда до 200 А при напряжении холостого хода 75 В. На образцы подается отрицательное, относительно рабочей камеры, электрическое смещение от дополнительного источника 7, с возможностью работы как в постоянном режиме, так и в импульсном с частотой до 50 кГц и с регулировкой коэффициента заполнения выходных импульсов в диапазоне от 1 % до 99 % с дискретностью 1%. Напряжение смещения источника до 1000 В и ток до 1 А. Источник оснащён цифровой системой защиты, предотвращающей появление и функционирование микродуг на обрабатываемых изделиях.

2.2 Аппаратура и методики проведения экспериментальных исследований

2.2.1 Методика измерения вольт-амперных характеристик тлеющего разряда

Для построения вольт-амперной характеристики производилось измерение параметров основного разряда: ток измерялся с помощью датчика Холла, напряжение с помощью осциллографа Tektronix TDS1001A с использованием делителя напряжения 1:100. Разряд зажигался в атмосфере азота при давлении 1 Па. При измерении тока тлеющего разряда I_{ml} , изменялось напряжение разряда U_{ml} с помощью ручки регулировки на блоке питания 12 (рис.2.3). Ток дугового разряда I_d оставался неизменным в процессе измерения.

2.2.2 Измерение эмиссионных характеристик разряда

Данный эксперимент показывал зависимость тока основного разряда от тока вспомогательного. Разряд зажигался в среде азота при давлении 1 Па, измерительная аппаратура аналогична предыдущему эксперименту. При измерении тока тлеющего разряда $I_{тл}$, изменялся ток дугового разряда I_d с помощью ручки регулировки переменного резистора на блоке источника 13 (рис.2.3), напряжение разряда $U_{тл}$ оставалось неизменным.

2.2.3 Измерение газовых характеристик разряда

В эксперименте устанавливалось зависимость тока тлеющего разряда от изменения давления в камере. Давление измерялось с помощью датчиков ПМТ-2, ПМИ-10-2 и вакуумметра Мерадат-ВИТ19ИТ2. Подача и регулировка газа в камеру осуществлялось с помощью натекателей РРГ-10 и блока управления БУИП-3. При измерении тока тлеющего разряда, производилось изменение давления с помощью ручки регулировки блока управления натекателями. Ток дугового разряда и напряжение тлеющего оставались неизменными в процессе эксперимента.

2.2.4 Зондовые измерения характеристик плазмы

Зондовые измерения параметров плазмы проводились с помощью одиночного цилиндрического зонда Ленгмюра из вольфрамовой проволоки диаметром 0,5 мм и длиной 5 мм, который был закреплён на боковом фланце и устанавливался в центре вакуумной камеры. Измерение потенциала зонда и снятие ВАХ зонда производилось специальной автоматизированной системой 16 (рис.2.3) снятия зондовых характеристик [17]. Опорным электродом являлся анод разряда. Напряжение основного разряда при измерениях составило 250 В и ток 100А, при давлении 1 Па. При изменении потенциала

зонда от -90 В до 90 В системой снималось 1000 значений тока и напряжения на зонд. Данные собирались и обрабатывались в Microsoft Excel 2013. Полученные значения тока и напряжения усреднялись по трём точкам, а затем сглаживались в диапазоне 0,1. По полученным результатам строился график ВАХ зонда. По графику ВАХ в точке $I_z=0$ определяется плавающий потенциал, эта точка соответствует равенству ионного и электронного тока на зонд.

Дальнейшая обработка ведётся по электронной ветви, так как N_2 – молекулярный газ и возможно неточности в определении массы иона из-за наличия атомарных ионов. Далее для определения потенциала плазмы U_p , данные дифференцировались dI_z/dU_z , и по полученным значениям строился график dI_z/dU_z от U_z , и в точке максимума, который является перегибом электронной ветви исходного графика ВАХ, и определяется потенциал плазмы U_p [8]. В точке ВАХ равный потенциалу плазмы характер роста тока перестаёт быть экспоненциальным, так как соответствует Максвелловскому распределению электронов по энергиям.

Далее для определения температуры электронов производились следующие расчёты: рассчитывался $\ln I_z$ для каждого значения тока зонда, затем значения дифференцировались $dU_z/d\ln I_z$, и по полученным значениям строился график $dU_z/d\ln I_z$ от U_z . Путём усреднения значений $dU_z/d\ln I_z$, в области линейного роста определялась температура электронов T_e .

Концентрация плазмы n_p рассчитывалась с помощью ВАХ зонда. Строилась касательная к электронной ветви ВАХ в области насыщения при потенциале зонда равном потенциалу плазмы где и определялся электронный ток насыщения I_{z3} . Так как плазма квазинейтральная, то $n_p=n_e=n_i$, концентрации плазмы, электронов и ионов соответственно равны, то дальнейшие вычисления n_p рассчитываются по формуле (2.1) [8]:

$$I_{z3} = \frac{1}{4} e n_e S_3 \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}}, \quad (2.1)$$

где S_z – площадь зонда;
 e – заряд электрона;
 m_e – масса электрона;
 T_e – температура электрона;
 k – постоянная Больцмана.

2.2.5 Методика проведения процессов азотирования титана в плазме несамостоятельного дугового разряда

Образец титана марки ВТ1-0 с размерами $15 \times 15 \times 4$ мм был отполирован с тыльной и передней стороны и очищен в течение 10 минут в ультразвуковой ванне с бензином. Образец плотно закреплялся на держателе 1 (рис.2.4) диаметром 100 мм и толщиной 12 мм в центре камеры напротив плазменного источника. Тепловой контакт с держателем и измерение температуры производится с помощью хромель-алюмелевой термопары. Откачка из камеры до рабочего давления производится вакуумной системой до давления 10^{-2} Па. После откачки в камеру подаётся аргон для ионной очистки. Разряд зажигается после подачи напряжения на электроды от блока питания накала 9, блока питания разряда 8 и подачи тока на магнитную катушку 6. После инициирования разряда включается блок питания отрицательного смещения на подложку 7. Очистка образца в плазме аргона проходит в течении 15 минут при давлении $\sim 0,5$ Па при токе разряда (10 – 100) А. Ионы из плазмы, потенциал которой близок к потенциалу анода (камеры), ускоряются на обрабатываемый образец и бомбардируют его поверхность с энергией практически равной потенциалу образца относительно камеры, так как ионы не претерпевают столкновений с молекулами рабочего газа в катодном слое и не теряют своей энергии. Это позволяет реализовывать эффективную ионную очистку, нагрев и активацию поверхности. После очистки и нагрева образца, подача аргона прекращается и включается напуск газовой смеси ($N_2 + He$) либо N_2 , при этом устанавливалось давление (0.6 – 1) Па и ток разряда (30 – 120) А.

Азотирование проводилось при постоянном смещении напряжения на подложку (300 – 1000) В, которое определяет температуру подложки. После проведения процесса деталь охлаждается до 200 °С в вакууме и извлекается из камеры, после чего с обеих сторон измерялась микротвёрдость на поверхности и распределение микротвердости по глубине.

2.2.6 Методика проведения процессов азотирования стали в плазме несамостоятельного тлеющего разряда

Проведение процессов азотирования в плазме тлеющего несамостоятельного разряда с полым катодом большой площади начинается с установки детали 7 с образцами (рис.2.3) в центре камеры, напротив источника электронов. Эксперименты проводились на образцах, выполненных из стали марки 30Х16, с размерами 15×10×5 мм. Образцы были отполированы и очищены в ультразвуковой ванне с бензином в течении 10 минут. На деталь устанавливалась термопара через изолирующий кварцевый стаканчик. Это делалось с целью предотвращения электрического контакта термопары с деталью, которая находилась под потенциалом катода основного разряда. Затем крышка камеры закрывается и производится откачка из камеры до 10^{-2} Па. После откачки в камеру подаётся газовая смесь (N_2+He) либо N_2 и устанавливается давление (0.6 – 1) Па., подаётся ток на магнитную катушку 4 (рис. 2.3) 0,18 А, включается блок питания дугового разряда 13 и блок питания поджига 14 (рис. 2.3), выставляется ток разряда (15 – 100) А, в зависимости от требуемого значения. Далее включается блок питания тлеющего разряда в импульсном режиме и задаются параметры импульсного напряжения: напряжение (100-300) В, частота до 5 кГц, коэффициент заполнения импульса (5 – 30) %. Увеличивая постепенно коэффициент заполнения импульса до 100% производится нагрев детали и очистка стенок камеры от оксидов в течении 30 минут. Импульсный режим горения разряда в данный момент нагрева и очистки необходимо, для предотвращения дугообразования, из-за

загрязнения и оксидов на поверхности детали с образцами. После достижения заданной температуры начинается процесс азотирования, который производится в течении заданного времени. После проведения азотирования деталь охлаждается до температуры ниже 200 °С и извлекается из камеры. Затем на поверхности обработанных образцов измерялась микротвёрдость и шероховатость, а на поперечном шлифе толщина нитридного слоя.

2.2.7 Методика проведения процессов азотирования стали в плазме несамостоятельного дугового разряда

Образцы из стали марки 30X16 с размерами 15×10×5 мм крепились на держателе образцов 1 (рис.2.4) который размещался в центре камеры таким образом, чтобы один образец был на лицевой к плазмогенератору стороне, второй - на боковой стороне, а третий - на обратной. На деталь устанавливалась термопара через изолятор для измерения температуры. Крышка камеры закрывается и включается подача охлаждающей воды в установку. Далее производится откачка из камеры вакуумной системой до 10^{-2} Па. После откачки в камеру подаётся аргон для ионной очистки и зажигается разряд аналогичным способ, описанным в пункте 2.2.5 при давлении 0,5 Па. После очистки подача аргона прекращается и включается напуск газовой смеси (N_2+He) либо N_2 , устанавливается давление (0.6 – 1) Па, ток разряда (30 – 120) А. Азотирование проводится при постоянном смещении напряжения на подложку (300 – 1000) В, которое определяет температуру подложки и образцов. После проведения процесса деталь охлаждалась до 200 °С в вакууме и извлекалась из камеры. Далее измерялась микротвёрдость и шероховатость на поверхности образцов, а на поперечном шлифе толщина азотированного слоя.

2.2.8 Исследование свойств азотированной поверхности образцов и изделий

На поверхности обработанных образцов измерялась шероховатость и микротвёрдость, а на поперечных шлифах образцов измерялись распределение микротвёрдости по глубине образца и толщина модифицированного слоя.

Для измерения толщины модифицированного слоя в образцах проводились металлографические исследования с помощью микровизора μ Vizo-MET-221 (рис. 2.5) в диапазоне увеличений от $\times 50$ до $\times 500$. Микровизор предназначен для исследования микроструктуры металлов, сплавов и других непрозрачных объектов. Попавшая в объектив микровизора исследуемая область выводится на экран собственного дисплея, либо подключённого монитора. На экране отображается цветное прямоугольное увеличенное изображение объекта при прямом освещении в светлом и темном поле, поляризованном свете и методом дифференциально-интерференционного контраста. Запись изображения можно производить на карту памяти.



Рисунок 2.5. Микровизор металлографический μ Vizo-MET-221.

1 - штатив; 2 - тубус; 3 - манипулятор «мышь»; 4 - дисплей; 5 – источник света; 6 - револьвер; 7 - объектив; 8 - предметный столик.

Исследовались шлифы металлических образцов, подготовленные стандартными методами [18]. На начальном этапе пробоподготовки для металлографических исследований образцы закреплялись в оснастке. Затем производилось механическое шлифование образцов на шлифовально-полировальном станке с различными размерами абразивных зёрен шлифовальных бумаг. На завершающем этапе производилась полировка образцов в оснастке на мягких тканях с добавлением алмазной пасты [19].

Микротвёрдость поверхностного модифицированного слоя металлов и сплавов измерялась по методу Виккерса [20]. Измерение твёрдости по Виккерсу заключается в следующем: на исследуемую поверхность осуществляется вдавливание алмазной четырёхгранной пирамиды с углом её граней при вершине 136° , после чего остаётся квадратный отпечаток с диагоналями (рис. 2.6) [21]. Нагрузка на индентор может составлять 0,1 Н до 1 Н.

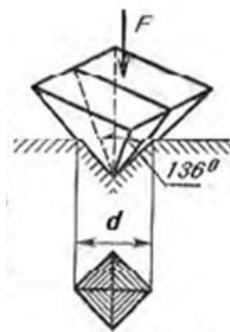


Рисунок 2.6. Схема измерений микротвёрдости по Виккерсу (HV)

Число твердости HV вычисляют по формуле (2.2):

$$HV = kP/d^2 = 1,854P/d^2, \quad (2.2)$$

где P - нагрузка на индентор, Н;

d - диагональ отпечатка, мм;

k - коэффициент, зависящий от формы индентора и для пирамиды Виккерса равный 1,854.

Микротвёрдость исследуемых материалов производится на микротвёрдомере ПМТ-3 (рис. 2.7) [22, 23].

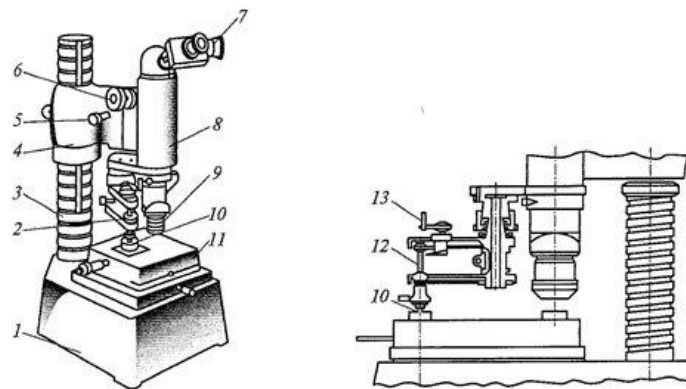


Рисунок 2.7. Микротвердомер ПМТ-3. 1 - основание;

2 - нагружающий механизм; 3 - стойка; 4 - кулиса; 5- винт для тонкой настройки; 6 - винт для грубой настройки; 7 - окулярный микрометр;

8- измерительный микроскоп; 9 - объектив; 10 - алмазная пирамида;

11 - предметный столик; 12 - стержень; 13 – рукоятка

Измерение параметров шероховатости поверхности плоских образцов проводили при помощи микроскопа-нанопрофилометра МНП-1 (рис. 2.8) [24]. Принцип действия профилометра основан на использовании интерференции частично-когерентного света. Измерение производится посредством сканирования рельефа измеряемой поверхности по высоте. При измерении используется как амплитудная, так и фазовая информация автокорреляционной функции интерферирующего света. Такой принцип позволяет производить измерения в широком диапазоне и решать большинство измерительных задач. Доступна так же постобработка результатов 3D-реконструкции, а именно: фильтрация усреднением по площади, интерполяция пропущенных точек, инверсия и смещение по вертикали.

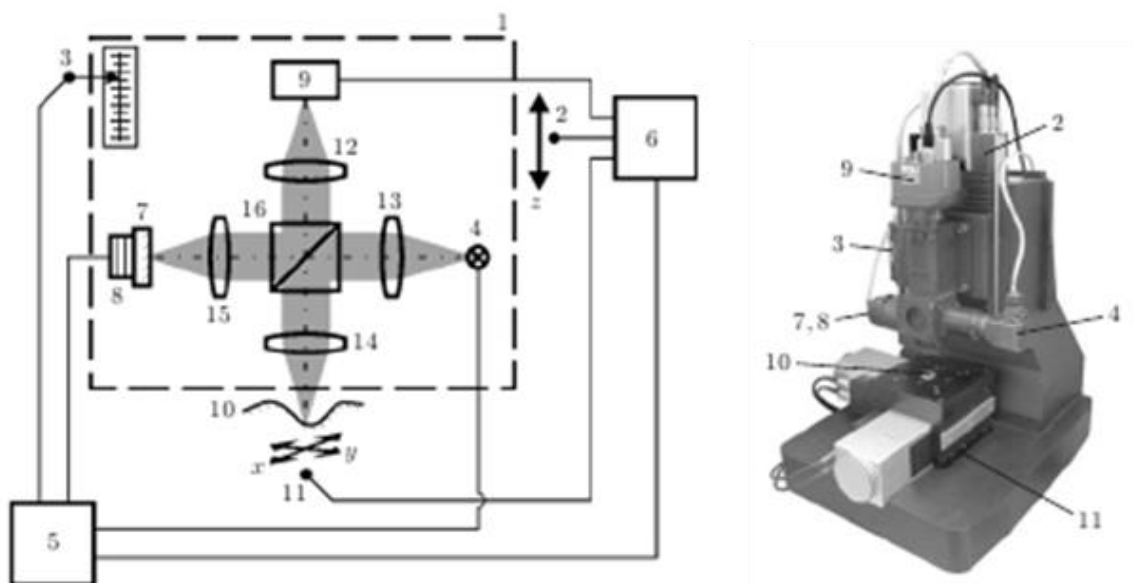


Рисунок 2.8. Структурная схема прибора МНП-1 и общий вид оптико-механического блока. 1 - блока интерферометра; 2 - столик вертикального перемещения; 3 - оптическая линейка; 5 - контроллер управления; 6 - персональный компьютер; 7 – опорное зеркало; 8 – пьезокерамический актюатор; 9 – цифровая ПЗС-камера 10 - объект исследования; 11 - двухкоординатный предметный столик; 12-15 – объективы.

Глава 5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

5.1 Предпроектный анализ

5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Основными потребителями оборудования и технологии ионно-плазменного азотирования (ИПА) являются автомобильные, тракторные, авиационные, судостроительные и судоремонтные, машино- и станкостроительные заводы, заводы по производству сельскохозяйственной техники, насосного и компрессорного оборудования, шестерен, подшипников, пресс-форм, алюминиевых профилей, энергетических установок и др.

Метод ионно-плазменного азотирования является одним из наиболее динамично развивающихся направлений химико-термической обработки в индустриально развитых странах. Широкое применение метод ИПА нашел в автомобилестроении. Он с успехом применяется ведущими авто и моторостроительными предприятиями мира: DaimlerChrysler (Mercedes), Audi, Volkswagen, Voith, Volvo.

Например, данным методом обрабатываются следующие изделия: форсунки для легковых автомобилей, несущие пластины автоматического привода, матрицы, пуансоны, штампы, пресс-формы (DaimlerChrysler), пружины для системы впрыска (Opel), коленчатые валы (Audi), распределительные (кулачковые) валы (Volkswagen), коленчатые валы для компрессора (Atlas, США и Wabco, Германия), шестерни для BMW (Handl, Германия), автобусные шестерни (Voith), упрочнения прессового инструмента в производстве алюминиевых изделий (Нугховенс, Скандекс, Джон Девис и др.).

Есть положительный опыт промышленного использования данного метода странами СНГ: Беларусь - МЗКТ, МАЗ, БелАЗ; Россия - АвтоВАЗ,

КамАЗ, ММПП «Салют», Уфимское моторостроительное объединение (УМПО).

Методом ИПА обрабатываются: шестерни (МЗКТ), шестерни и другие детали (МАЗ), шестерни большого (более 800 мм) диаметра (БелАЗ), впускные и выпускные клапаны (АвтоВАЗ), коленчатые валы (КамАЗ).

Преимущества ионно-плазменного азотирования проявляются в существенном сокращении основных издержек производства. Так, например, по сравнению с газовым азотированием ИПА обеспечивает: сокращение продолжительности обработки от 2 до 5 раз, как за счет снижения времени нагрева - охлаждения садки, так и за счет уменьшения времени изотермической выдержки, сокращение расхода рабочих газов (20 - 100 раз), сокращение расхода электроэнергии (1,5 - 3 раза), снижение деформации настолько, чтобы исключить финишную шлифовку, улучшение санитарно-гигиенических условий производства, полное соответствие технологии всем современным требованиям по охране окружающей среды

По сравнению с закалкой обработка методом ионно-плазменного азотирования позволяет: исключить деформации, увеличить ресурс работы азотированной поверхности (2-5 раз)

Применение ионно-плазменного азотирования вместо цементации, нитроцементации, газового или жидкостного азотирования, объемной или ТВЧ закалки позволяет: сэкономить основное оборудование и производственные площади, снизить станочные расходы, транспортные затраты, уменьшить расход электроэнергии, активных газовых сред.

5.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное

исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

С этой целью может быть использована вся имеющаяся информация о конкурентных разработках: технические характеристики разработки; конкурентоспособность разработки; уровень завершенности научного исследования (наличие макета, прототипа и т.п.); бюджет разработки; уровень проникновения на рынок; финансовое положение конкурентов, тенденции его изменения и т.д.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты, пример которой приведен в таблице 5.1. Для этого необходимо отобрать не менее трех-четырех конкурентных товаров и разработок.

Таблица 5.1 – Оценочная карта.

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Длительность процессов азотирования	0,2	5	2	4	1	0,4	0,8
2. Автоматизация установки	0,05	5	3	4	0,2	0,15	0,2
3. Энергоэкономичность	0,05	4	2	3	0,2	0,1	0,15
4. Надежность	0,05	5	4	4	0,25	0,2	0,2
5. Безопасность	0,05	5	1	1	0,25	0,05	0,05
6. Потребность в расходных материалах	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
7. Простота эксплуатации	0,05	4	3	3	0,2	0,15	0,15
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,1	5	2	2	0,5	0,2	0,2
2. Уровень проникновения на рынок	0,05	4	3	3	0,2	0,15	0,15
3. Цена	0,1	4	3	3	0,4	0,3	0,3
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	5	4	3	0,25	0,2	0,15

5. Послепродажное обслуживание	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
6. Финансирование научной разработки	0,1	5	3	3	0,5	0,3	0,3
7. Срок выхода на рынок	0,05	5	3	2	0,25	0,15	0,1
Итого	1	66	43	45	4,7	2,85	3,25

K1 – первый конкурент, это установки газового азотирования.

K2 – второй конкурент, азотирование из растворов электролитов.

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в табл. 1, подбираются, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

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

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле (5.1).

$$K = \sum B_i \cdot b_i, \quad (5.1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

b_i – балл i -го показателя.

Основываясь на знаниях о конкурентах, следует объяснить: чем обусловлена уязвимость позиции конкурентов и возможно занять свою нишу и увеличить определенную долю рынка; в чем конкурентное преимущество разработки.

Итогом данного анализа, действительно способным заинтересовать партнеров и инвесторов, может стать выработка конкурентных преимуществ, которые помогут создаваемому продукту завоевать доверие покупателей

посредством предложения товаров, заметно отличающихся либо высоким уровнем качества при стандартном наборе определяющих его параметров, либо нестандартным набором свойств, интересующих покупателя.

5.1.3 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Матрица SWOT-анализа представлена в таблице 5.2.

Таблица 5.2 - Матрица SWOT-анализа.

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Высокая технологичность установок. С2. Экологическая чистота процесса. С3. Высокая развитость технологии. С4. Сравнительно не высокая стоимость оборудования. С5. Наличие бюджетного финансирования.	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Большой срок изготовления оборудования. Сл2. Большие сроки выполнения заказов. Сл3. Недостаточная осведомлённость о высоких технологиях в промышленности. Сл4. Большой срок поставок материалов и комплектующий, используемые при проведении научного исследования.
--	---	---

Возможности: В1. Востребованность практически во всех сферах производства. В2. Увеличивающийся интерес к ИПА технологиям. В3. Появление государственных программы по импортозамещению. В4. Повышение стоимости установок ИПА у конкурентов.	Высокая конкурентоспособность проекта на рынке в связи с господдержкой по импортозамещению и модернизации производства.	Нехватка квалифицированного персонала из-за высокой востребованности ИПА технологий
Угроза: У1. Изменение курса иностранной валюты. У2. Развитие отечественного сегмента рынка высоких технологий и повышение конкуренции. У3. Внешнеполитические факторы влияющие на экономику.	Повышение себестоимости научного проекта в связи с нестабильной ситуацией на рынке.	Происходит сдача своих позиций конкурентам в связи с увеличением срока выполнения проекта.

5.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Таблица 5.3 - Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации.

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел.	5	5
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела.	4	4

3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке.	5	4
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок.	5	4
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав.	5	5
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности.	5	5
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта.	4	3
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки.	3	3
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок.	4	4
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки.	4	4
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок.	5	5
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот.	4	4
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки.	5	5
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки.	3	3
15.	Проработан механизм реализации научного проекта.	4	4
	ИТОГО БАЛЛОВ	65	62

Суммарная оценка степени проработанности научного проекта составляет 65 баллов, а уровня имеющихся знаний у разработчика 62 балла. Данные оценки является показателем того, что такая разработка считается перспективной, а знания разработчика достаточными для успешной коммерциализации научного проекта.

5.2 Инициация проекта

Устав проекта:

1) Цели и результат проекта.

Таблица 5.4 - Заинтересованные стороны проекта.

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
1. Опытное производство ИСЭ СО РАН.	Новые заказы на изготовление нестандартных деталей.
2. Молодые сотрудники и студенты.	Получение квалифицированного опыта.
3. Поставщики комплектующих.	Новые заказы на материалы и оборудование.
4. Сотрудники организации.	Привлечение новых средств, развитие организации путём решения нестандартных задач.
5. Потребители	Улучшение характеристик и увеличения срока службы изделий

Таблица 5.5 - Цели и результаты проекта.

Цели проекта:	Разработка и изготовление установки ИПА.
Ожидаемые результаты проекта:	Повышение срока эксплуатации деталей, экономия ресурсов, сокращения ремонтных мероприятий в связи с выходом из строя деталей.
Критерии приёмки результата проекта:	Уменьшение себестоимости продукции в связи с внедрением технологий ИПА, увеличение срока службы деталей.
Требования к результату проекта:	Требование:
	Высокая скорость обработки изделий.
	Востребованность на рынке
	Длительный срок эксплуатации

2) Организационная структура проекта.

Таблица 5.6 - Организационная структура проекта.

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудовые затраты, час.
1	Коваль Н.Н.	Руководитель проекта	отвечает за реализацию проекта в пределах заданных ограничений по ресурсам, координирует деятельность участников проекта.	1712

2	Иванов В.В.	Заказчик проекта	Контроль расходов, финансирование.	-
3	Лопатин И.В.	Консультант	Разработка технологии.	736
4	Игнатов Д.Ю.	Магистрант	Исполнитель проекта.	1592
ИТОГО:				4040

3) Ограничения и допущения проекта.

Таблица 5.7 - Ограничения проекта.

Фактор	Ограничения/допущения
3.1. Бюджет проекта	9 300 000 руб
3.1.1. Источник финансирования	Предоплата заказчика
3.2. Сроки проекта:	
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	15 июня 2015 г.
3.2.2. Дата завершения проекта	31 декабря 2015 г.

5.3 Планирование управления научно-техническим проектом

5.3.1. Иерархическая структура работ проекта

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



Рисунок 5.1. Иерархическая структура работы по проекту.

5.3.2. Контрольные события проекта

В рамках данного проекта определяются ключевые события проекта, определяются их даты и результаты, которые должны быть получены по состоянию на эти даты.

Таблица 5.8 - Контрольные события проекта.

№ п/п	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Составление технического задания	15 июня 2015 г.	Заключение договора
2	Изучение научной и технической литературы	30 июня 2015 г.	Отчёт о проделанной работе
3	Создание чертежей и схем	31 июля 2015 г.	Чертежи и схемы
4	Закупка материалов и оборудования	15 августа 2015 г.	Список материалов и оборудования
5	Заказ деталей в опытном производстве	15 сентября 2015 г.	Заявка на изготовление деталей

6	Предварительная сборка и наладка установки ИПА	15 декабря 2015 г.	Отчёт об испытании
7	Сборка на территории заказчика	31 декабря 2015 г.	Акт о приёмке в эксплуатацию

5.3.3 План проекта

В рамках планирования научного проекта построен календарный и сетевой график проекта. Линейный график представлен в виде таблицы 5.9.

Таблица 5.9 - Календарный план проекта.

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников (ФИО ответственных исполнителей)
1	Составление технического задания	15	1.06.15	15.06.15	Иванов В.В., Коваль Н.Н., Лопатин И.В.
2	Изучение научной и технической литературы	61	16.06.15	30.06.15	Лопатин И.В., Игнатов Д.Ю.
3	Создание чертежей и схем	31	1.07.15	31.7.15	Лопатин И.В., Игнатов Д.Ю.
4	Закупка материалов и оборудования	15	1.8.15	15.8.15	Коваль Н.Н.
5	Заказ деталей в опытном производстве	31	16.8.15	15.9.15	Игнатов Д.Ю.
6	Предварительная сборка и наладка установки ИПА	91	16.9.15	15.12.15	Лопатин И.В., Игнатов Д.Ю.
7	Сборка на территории заказчика	16	16.12.15	31.12.15	Лопатин И.В., Игнатов Д.Ю.

Диаграмма Ганта - это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени

отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

График построен и представлен в виде таблицы 5.10, с разбивкой по месяцам и декадам (15 дней) за период времени выполнения научного проекта.

Таблица 5.10 -Календарный план-график проведения НИОКР по теме.

Код работы	Вид работы	Исполнители	Т _к , кол, дн.	Продолжительность выполнения работ													
				июнь		июль		авг.		сен.		окт.		нояб.		дек.	
				1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	Составление технического задания	Заказчик, руководитель, консультант	15														
2	Изучение научной и технической литературы	Магистрант, консультант	61														
3	Создание чертежей и схем	Магистрант, консультант	31														
4	Закупка материалов и оборудования	Руководитель	15														
5	Заказ деталей в опытном производстве	Магистрант	31														
6	Предварительная сборка и наладка установки ИПА	Магистрант, консультант	91														
7	Сборка на территории заказчика	Магистрант, консультант	16														

 - руководитель проекта,
  - заказчик,
  - консультант,
  - магистрант (дипломник).

5.3.4. Бюджет научной разработки

В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям:

1) Материалы и оборудования.

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме.

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены). В эту же статью включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов). Результаты по данной статье заносятся в таблице 5.11.

Таблица 5.11 - Расчет затрат по статье «Материалы и оборудование».

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена	Сумма, руб.
Насос ТМН	FF1600	1 шт	750000	750000
Насос форвакуумный пластинчато- роторный 24 л/мин	-	1 шт	240000	240000
Клапан вакуумный	ДУ40	2 шт	25000	50000
Клапан вакуумный	ДУ25	2 шт	18000	36000
Затвор	-	1 шт	160000	160000
Тройник	-	2 шт	2500	5000
Четверник	-	1 шт	3000	3000
Хомут в сборе	-	40	500	20000
Сильфон	100 мм	1 шт	2500	2500
Вакуумметр Мерадат	Мерадат ВИТ19ИТ1	1 шт	55000	55000
Вакуумметр термопарный Мерадат	ВИТ12Т3	2 шт	13000	26000
Натекатель газовый	РРГ10	2 шт	27000	54000
Блок питания тлеющего разряда	30 кВт	1 шт	800000	800000
Блок питания источника электронов	10 кВт	1 шт	250000	250000
Камера вакуумная	-	1 шт	500000	500000

Рама	-	1 шт	100000	100000
Балон газовый	-	2 шт	7500	15000
Стойка с комплектом крепежа	-	1 шт	30000	30000
Персональный компьютер с монитором и источником бесперебойного питания	-	1 шт	70000	70000
Автоматика	промышленный контроллер, контакторы, клеммы, провода, источники питания, светофор	1 шт	200000	200000
Компрессор	-	1 шт	15000	15000
Всего за материалы				3181500
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				127260
Итого по статье С _м				3308760

2) Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ.

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме.

При применении нелинейного метода норма амортизации осциллограф TDS 2014C определяется по формуле (5.2) и представлена в таблице 5.12.

$$K=(2/n) \cdot 100\%=(2/120) \cdot 100\%=1,66\%, \quad (5.2)$$

где K - норма амортизации в процентах к остаточной стоимости, применяемая к данному объекту амортизируемого имущества;

n - срок полезного использования данного объекта амортизируемого имущества, выраженный в месяцах.

Таблица 5.12 – расчёт нелинейной амортизации осциллографа TDS 2014C.

Остаточная стоимость, нелинейный метод	Норма амортизации, нелинейный метод
147000	2450
144550	2409
142140	2369
139771	2329
137442	2290
135151	2252
Остаточная стоимость: 132899	

Таблица 5.13 - Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ».

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, руб.	Норма амортизации в процентах, нелинейный метод	Амортизация за 7 месяцев	Итого
1.	Осциллограф TDS 2014C	1 шт	147000	1,66%	14101	21101
2.	Мультиметр FLUKE 107	1 шт	7000	-	-	

3) Основная заработная плата.

В настоящую статью включается основная заработная плата магистранта, руководителя проекта и консультанта.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату и рассчитывается по формуле (5.3).

$$C_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (5.3)$$

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

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) руководителя, консультанта и магистранта рассчитывается по следующей формуле (5.4).

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}}, \quad (5.4)$$

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

$T_{\text{р}}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле (5.5).

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (5.5)$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

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

при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,5$ месяца, 5-дневная неделя;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (табл. 5.14).

Таблица 5.14 - Баланс рабочего времени.

Показатели рабочего времени	Руководитель	Консультант	Магистрант
Календарное число дней	366	366	366
Количество нерабочих дней			
- выходные дни	105	105	105
- праздничные дни	14	14	14
Потери рабочего времени			
- отпуск	48	48	24
- невыходы по болезни	-	-	-

Действительный годовой фонд рабочего времени	199	199	223
--	-----	-----	-----

Месячный должностной оклад работника рассчитывается по формуле (5.6).

$$З_{\text{м}} = З_{\text{б}} \cdot (k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}}, \quad (5.6)$$

где $З_{\text{б}}$ – базовый оклад, руб.;

$k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, (определяется Положением об оплате труда);

$k_{\text{д}}$ – 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);

$k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 5.15.

Таблица 5.15 - Расчёт основной заработной платы.

Исполнители	$З_{\text{б}}$, руб.	$k_{\text{р}}$	$З_{\text{м}}$, руб.	$З_{\text{дн}}$, руб.	$T_{\text{р}}$, раб. дн.	$З_{\text{осн}}$, руб.
Руководитель	35400	1,3	46020	1867	30	56010
Консультант	20000	1,3	26000	1055	214	225770
Магистр	6500	1,3	8450	424	229	97096

4) Дополнительная заработная плата научно-производственного 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).

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы и рассчитывается по формуле (5.7)

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}}, \quad (5.7)$$

где $З_{\text{доп}}$ - дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{\text{доп}}$ - коэффициент дополнительной зарплаты;

$З_{\text{осн}}$ - основная заработная плата, руб.

В таблице 5.16 приведена форма расчёта основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 5.16 - Заработная плата исполнителей НТП.

Заработная плата	Руководитель	Консультант	Магистрант
Основная зарплата	56010	225770	97096
Дополнительная зарплата	7001	28222	12137
Итого по статье $C_{\text{зп}}$	63001	253992	109233

5) Отчисления на социальные нужды.

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды и рассчитывается по формуле (5.8).

$$C_{\text{внебруководитель}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) = 0,3 \cdot 63001 = 18903, \quad (5.8)$$

$$C_{\text{внебконсультант}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) = 0,3 \cdot 253992 = 76197,$$

$$C_{\text{внебмагистрант}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) = 0,3 \cdot 109233 = 32769,$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды 30% (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и фонд социального страхования).

6) 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.

Расходы на командировку руководителя проекта составило 6300 руб., консультанта 25399 руб. и магистранта 10923 руб.

7) Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями.

Затраты на изготовление деталей в опытно-промышленном производстве составили 250000 руб.

8) 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.

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

Расчет накладных расходов ведется по формуле (5.8).

$$C_{\text{наклруководитель}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0,9 \cdot 63001 = 56700, \quad (5.8)$$

$$C_{\text{наклконсультант}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0,9 \cdot 253992 = 228592,$$

$$C_{\text{наклмагистрант}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0,9 \cdot 109233 = 98309,$$

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

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости НТП (название темы) по форме, приведенной в табл. 5.17.

Таблица 5.17 - Группировка затрат по статьям, руб.

Статьи	
Материалы и оборудования	3308760
Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	21101
Основная заработная плата	378876
Дополнительная заработная плата	47360
Отчисления на социальные нужды	127869
Научные и производственные командировки	42622
Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями	250000
Прочие накладные расходы	383601
ИТОГО:	4560189

Приложение А

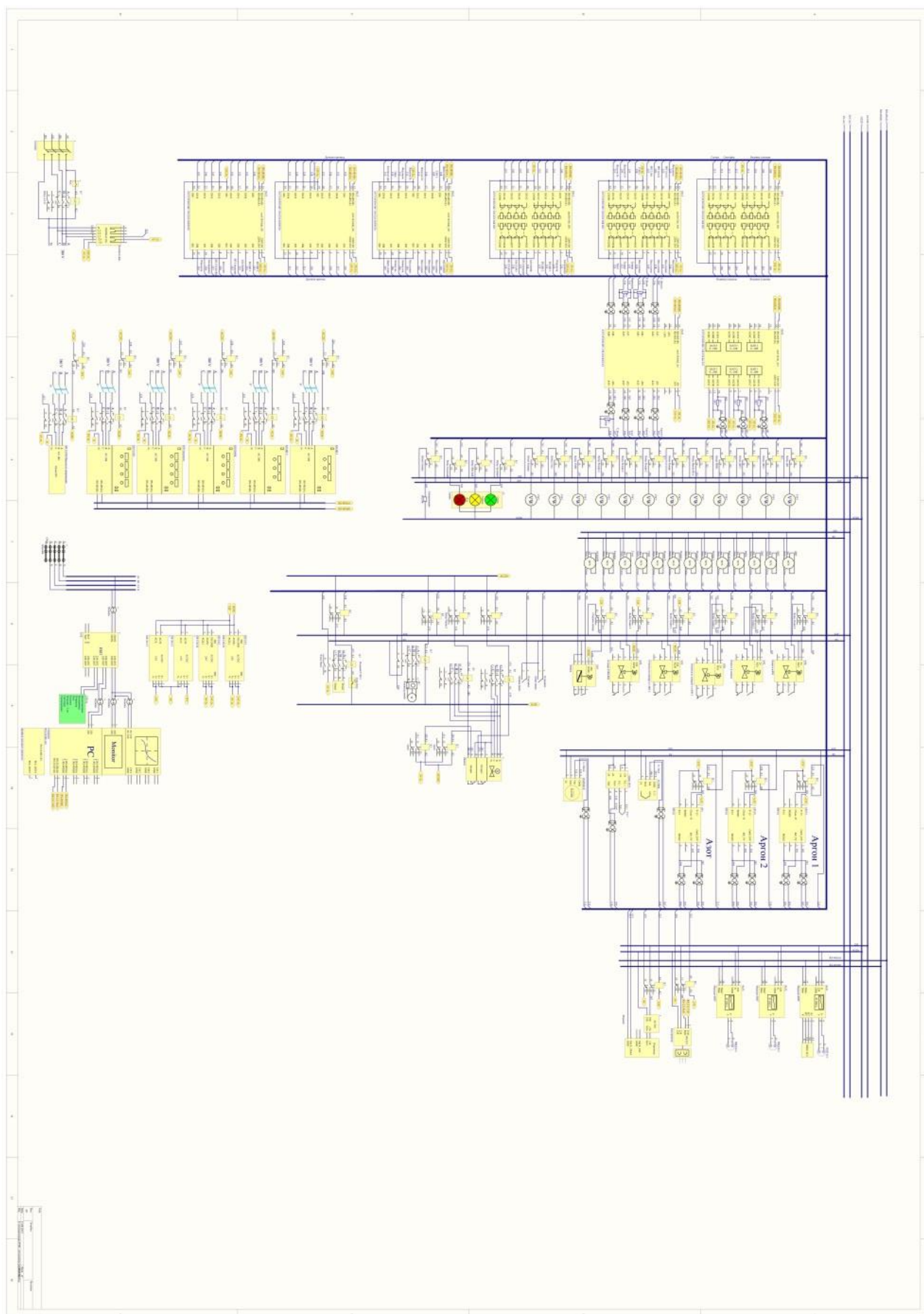


Рисунок А.1 Схема автоматизации АНП 31-600