

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 03.03.02 Физика
 Отделение школы (НОЦ) отделение экспериментальной физики (ОЭФ)

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Применение высокоинтенсивной имплантации ионов азота низкой энергии для обработки внутренних поверхностей отверстий

УДК 621.384.665:539.2:539.1

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б71	Гурулев Александр Валерьевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший научный сотрудник НЛВИИ ИШФВП	Сивин Д.О.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Спицына Л.Ю.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД	Мезенцева И.Л.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭФ ИЯТШ	Склярова Е.А.	к.п.н., доцент		

Запланированные результаты освоения ООП

Код	Результат освоения ООП
P1	Использовать основные этапы и закономерности исторического развития общества, основы философских, экономических, правовых знаний для формирования мировоззренческой, гражданской позиций и использования в различных сферах жизнедеятельности
P2	Уметь работать в коллективе, быть готовым к коммуникации в устной и письменной формах, в том числе на иностранном языке, толерантно воспринимать социальные, этические и культурные различия, использовать методы и средства физической культуры, приёмы первой помощи и методы защиты в условиях ЧС.
P3	Использовать в профессиональной деятельности базовые естественнонаучные знания, современные концепции и ограничения естественных наук, использовать фундаментальные знания разделов общей и теоретической физики, математики для создания моделей и решения типовых профессиональных задач, в том числе с использованием знаний профессионального иностранного языка.
P4	Понимать сущность и значение информации, соблюдать основные требования информационной безопасности, использовать методы, способы, средства получения и хранения информации, решать стандартные задачи на основе информационной и библиографической культуры.
P5	Применять организационно-управленческие навыки при работе в научных группах, критически переосмысливать накопленный опыт, изменять при необходимости профиль своей профессиональной деятельности, нести ответственность за последствия своей инженерной деятельности.
P6	Проводить научные теоретические и экспериментальные исследования в областях: материаловедения, атомной и ядерной физики, водородной энергетики, с помощью современной приборной базы с использованием специализированных знаний физики и освоенных профильных дисциплин.
P7	Применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований, а также профессиональные знания и умения для проведения физических исследований в инновационных областях науки, используя современные методы обработки, анализа и синтеза информации.
P8	Использовать на практике теоретические основы организации и планирования физических исследований, участвовать в подготовке и составлении научной документации по установленной форме, понимать и применять на практике методы управления в сфере природопользования

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

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки (специальность) 03.03.02 «Физика»
 Отделение школы (НОЦ) Экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

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

Студенту:

Группа	ФИО
0Б71	Гурулев Александр Валерьевич

Тема работы:

Применение высокоинтенсивной имплантации ионов азота низкой энергии для обработки внутренних поверхностей отверстий
Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектом исследования являются высокоинтенсивные пучки ионов азота низкой энергии (1.4 кэВ) с плотностью тока несколько десятков мА/см². Целью работы является применение высокоинтенсивных низкоэнергетических пучков ионов азота для обработки внутренних поверхностей отверстий.</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – Обзор литературных источников – Разработка коллекторного узла нового типа – Исследование модификации внутренних поверхностей отверстий высокоинтенсивной низкоэнергетической ионной имплантацией – Исследование воздействия ионного распыления на поверхность образца

<i>работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	<ul style="list-style-type: none"> – Социальная ответственность – Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение – Заключение
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	<ul style="list-style-type: none"> – Сборочный чертеж коллекторного узла – Детализовка коллекторного узла (чертежи: держатель образцов, образец и т.д.)
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Спицына Любовь Юрьевна, Доцент ОСГН ШБИП ТПУ
Социальная ответственность	Мезенцева Ирина Леонидовна, Ассистент ООД
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший научный сотрудник НЛВИИ ИШФВП	Сивин Д.О.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б71	Гурулев Александр Валерьевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0Б71	Гурулеву Александру Валерьевичу

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЭФ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	03.03.02 «Физика»

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Затраты на сырьё, размер окладов, затраты на электроэнергию, амортизационные расходы
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Согласно проектной документации. Районный коэффициент 1.3
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды 30%

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Анализ и оценка конкурентоспособности НИ; SWOT-анализ
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Формирование плана и графика разработки: определение структуры работ; определение трудоёмкости работ; разработка графика Ганта. Формирование бюджета затрат на научное исследование: материальные затраты; заработная плата; отчисления во внебюджетные фонды; затраты на электроэнергию; амортизационные расходы.
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	Расчет и оценка сравнительной и финансовой эффективности

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>Оценка конкурентоспособности НИ</i>
2. <i>Матрица SWOT</i>
3. <i>Диаграмма Ганта</i>
4. <i>Основные показатели эффективности НИ</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Спицына Л.Ю.	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б71	Гурулев Александр Валерьевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0Б71	Гурулеву Александру Валерьевичу

Школа	ИЯТШ	Отделение (НОЦ)	ОЭФ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	03.03.02 «Физика»

Тема ВКР:

Применение высокоинтенсивной имплантации ионов азота низкой энергии для обработки внутренних поверхностей отверстий.

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования: ионно-модифицированные (азотированные) слои. Область применения: машиностроение.
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	– ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. – ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. – ПНД Ф 12.13.1-03.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные факторы: отклонение показателей микроклимата, отсутствие или недостаток необходимого естественного и искусственного освещения, превышение допустимого уровня шума, превышения уровня вибрации. Опасные факторы: опасность поражения электрическим током.
3. Экологическая безопасность:	Атмосфера: масляные пары форвакуумного насоса. Литосфера: в ходе работы дугового испарителя может образовываться осажденный слой (тяжелые металлы) на поверхности анода, очистка которого приводит к загрязнению литосферы.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	– Возможные ЧС: взрыв газовых баллонов, угроза возникновения пожара; – Типичное ЧС – пожар.

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД	Мезенцева И.Л.	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б71	Гурулев Александр Валерьевич		

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

Школа – Инженерная школа ядерных технологий

Уровень образования Бакалавриат

Направление подготовки – Физика конденсированного состояния

Отделение школы (НОЦ) – Отделение экспериментальной физики

Период выполнения (осенний / весенний семестр 2020/2021 учебного года)

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

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

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

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.10.2020	Аналитический обзор литературы	15
25.12.2020	Исследование модификации внутренних поверхностей отверстий высокоинтенсивной низкоэнергетической имплантацией азота	15
05.02.2020	Исследование воздействия ионного распыления на поверхность образца	20
30.04.2021	Анализ результатов	15
01.05.2021	Социальная ответственность	15
01.05.2021	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
05.06.2021	Заключение	5

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший научный сотрудник НЛВИИ ИШФВП	Сивин Д.О.	К.Т.Н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭФ ИЯТШ ТПУ	Склярова Е.А.	к.п.н., доцент		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 96 с., 25 рисунков, 15 формул, 21 таблица, 42 используемых источников, 5 приложений.

Ключевые слова: высокоинтенсивные пучки ионов азота низких энергий, высокоинтенсивная ионная имплантация, ионное распыление, баллистическая фокусировка.

Объектом исследования являются высокоинтенсивные пучки ионов азота низких энергий и их применение при обработке внутренних поверхностей отверстий.

Цель работы: продемонстрировать возможности метода высокоинтенсивной имплантации ионов азота низких энергий, в частности, при обработке внутренних поверхностей отверстий.

Экспериментально продемонстрирована эффективность применения метода высокоинтенсивной ионной имплантации для обработки внутренних поверхностей отверстий. В работе показано, что использование данного метода позволяет получить концентрацию азота, достигающую 22 ат.% и глубину имплантации вплоть до 12 мкм, при времени обработки 60 минут. Предложен способ обработки более протяженных отверстий.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ	9
ВВЕДЕНИЕ	12
1. ОБЩИЙ ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОЙ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ.....	15
1.1. Принципы формирования высокоинтенсивных пучков ионов металлов и газов	15
1.2. Формирование аксиально-симметричных пучков ионов азота	19
1.3. Формирование ленточных пучков	21
1.4. Влияние температуры на глубину распределения примеси.	23
1.5. Распыление твердого тела ионным пучком	24
Выводы по главе «Общий обзор состояния исследования высокоинтенсивной ионной имплантации»	26
2. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА	28
2.1. Экспериментальная установка.....	28
2.2. Источник газовой плазмы	30
2.3. Система формирования высокоинтенсивных ионных пучков.....	31
2.4. Разработка коллекторного узла для проведения экспериментов.....	34
2.5. Подготовка образцов	36
2.6. Средства измерения параметров ионного пучка	38
2.7. Методики исследований ионно-модифицированных образцов.....	39
Выводы по главе «Описание экспериментальной установки и методики эксперимента»	40
3. ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫМИ ПУЧКАМИ ИОНОВ АЗОТА НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ	41
3.1. Исследование распределения примеси азота на внутренних поверхностях отверстий.....	41
3.2. Исследование влияния ионного распыления при обработке внутренних поверхностей отверстий	44
3.3. Исследование модификации высокоинтенсивными низкоэнергетическими пучками ионов азота внутренних поверхностей отверстий с перемещением фокуса ионного пучка.....	47

Вывод по главе «Ионная имплантация высокоинтенсивными пучками ионов азота низкой энергии»	49
4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	50
Введение.....	50
4.1. Технико-экономическое обоснование научно-исследовательской работы	50
4.2. Потенциальные потребители результатов исследования	51
4.3. Анализ конкурентных технических решений.....	53
4.4. SWOT – анализ	55
4.5. Организация и планирование работ.....	57
4.6. Продолжительность этапов работ	59
4.7. Бюджет научного исследования	65
4.7.1. Расчёт материальных затрат	65
4.7.2. Расчет затрат на специальное оборудование для экспериментальных работ	65
4.7.3. Основная заработная плата исполнителей исследования.....	66
4.7.4. Дополнительная заработная плата исполнителей темы	68
4.7.5. Отчисления во внебюджетные фонды.....	68
4.7.6. Расчёт затрат на электроэнергию	69
4.7.7. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	70
4.8. Определение сравнительной эффективности исследования	70
Выводы по главе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	72
5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	74
Введение.....	74
5.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	74
5.2. Производственная безопасность	75
5.2.1. Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований.....	76
5.3. Экологическая безопасность.....	82
5.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	83

5.4.1. Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований.....	83
5.4.2. Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС	83
Выводы по разделу «Социальная ответственность»	84
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	86
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	88
Приложение А.....	92
Приложение Б.....	93
Приложение В.....	94
Приложение Г.....	95
Приложение Д.....	96

ВВЕДЕНИЕ

Значимая роль в разработке передовых технологий улучшения эксплуатационных и физико-химических характеристик различных материалов принадлежит методам модификации поверхностных свойств материалов.

Модификация поверхности является распространенным подходом к повышению твердости, износостойкости и коррозионной стойкости материалов и изделий, поскольку во многих случаях изменения свойств поверхности достаточно для улучшения общих характеристик обрабатываемой детали [1–5].

Ионная имплантация является важным методом модификации поверхностей материалов, обладает уникальными свойствами и способна, управляемо изменять элементарный и фазовый состав, микроструктуру поверхности материала. Ионизированными частицами могут быть ионы металлов и газов. Дальнедействующий эффект [6], обусловленный изменением дислокационной структуры металлов и сплавов на глубинах на порядки, превышающие предполагаемый пробег ионов, играет важную роль в улучшении макроскопических свойств [7].

Ионные пучки газов и металлов находят свое применение в технологиях ионной и ионно-плазменной модификации свойств поверхностных и приповерхностных слоев различных материалов. Методы сильноточной и высокоинтенсивной имплантации ионов средней и низкой энергии демонстрируют возможность образования глубоко легированных слоев в металлах и сплавах за счет усиленной излучением диффузии имплантированных атомов. Разработанный в последние годы метод низкоэнергетической высокоинтенсивной ионной имплантации [7–10] характеризуется сверхвысокими плотностями ионного облучения и нагревом облучаемой поверхности до высоких температур.

За последние два десятилетия, разработки в области создания пучковых и плазменных технологий, модификации поверхностных слоев материалов привели к значительному улучшению эксплуатационных характеристик.

Однако, ограниченная глубина ионно-модифицированного слоя, не превышающего единиц микрометров, до сих пор остается основным недостатком данного метода.

Классическая ионная имплантация проводится облучением иона с энергией в диапазоне 10-100 кэВ с плотностями токов от 1-100 мкА/см². Данные параметры позволяют получить ионно-легированный приповерхностный слой материала, не превышающий несколько долей микрометра.

В зависимости от технологических задач для решения проблемы малой толщины легированного ионного слоя использовались разные подходы.

В полупроводниковых материалах, для формирования глубоко легированных слоев использовались методы имплантации ионов высокой (несколько МэВ) и сверхвысокой (несколько сотен МэВ) энергией ионов. Однако использование подобного метода для модификации свойств и структуры металлов и сплавов является экономически невыгодно. Низкая стоимость изделий предполагает малозатратную технологию, а слабая чувствительность металлов к наличию примесей, увеличения дозы ионного облучения по сравнению с полупроводниковыми материалами. Что неизбежно приводит к повышению себестоимости.

При ионной модификации металлов и сплавов используется метод, основанный на увеличении глубины проникновения атомов примеси за счет радиационно-стимулированной диффузии в твердом теле, для создания глубоких ионно-легированных слоев. Данные методы носят названия «сильноточной» [11, 12] и «высокоинтенсивной» имплантации ионов [7, 13, 14].

Особенностью этих методов является нагрев обрабатываемой поверхности до температуры, ускоряющей диффузионное перемещение атомов внедренной примеси, что приводит к увеличению толщины модифицированного слоя.

При низкоэнергетической имплантации ионов азота энергией 1 кэВ, при плотностях тока в пределах 1-5 мА/см², были получены значительные

результаты по формированию глубоко легированных слоев. Исследования процессов сильноточной имплантации ионов азота показали, что глубина проникновения имплантируемых атомов зависит от плотности ионного тока.

Увеличение плотностей ионного тока с энергией около 1 кэВ до нескольких десятков и сотен mA/cm^2 , было достигнуто при использовании систем формирования пучков на основе плазменно-иммерсионной экстракции ионов, ускорения их в слое разделения зарядов с баллистической фокусировкой ионного пучка. Подобные высокие значения плотности ионного тока позволяют реализовать метод сверх высокодозовой имплантации и формирования глубоко ионно-легированных слоев за короткий промежуток времени.

Возможность формирования ионно-легированных слоев с глубинами в десятки и сотни микрометров была впервые продемонстрирована в Научной лаборатории высокоинтенсивной имплантации ионов [13, 14]. Разработанный метод позволил на несколько порядков улучшить эксплуатационные свойства материалов.

Целью данной работы является исследование закономерностей модификации внутренних поверхностей отверстий с помощью высокоинтенсивных импульсно-периодических пучков ионов азота низкой энергии. Новизна данного подхода не вызывает сомнения, так как известные в настоящее время методы ионной имплантации не позволяют обрабатывать внутренние поверхности отверстий. Практическая значимость результатов ВКР: доработана аксиально-симметричная система формирования высокоинтенсивных газовых пучков низких энергий на основе плазменно-иммерсионной экстракции ионов. Полученные результаты можно использовать для разработки различного рода научного или промышленного оборудования для ионно-плазменной обработки материалов с целью повышения их эксплуатационных свойств.

1. ОБЩИЙ ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОЙ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

1.1. Принципы формирования высокоинтенсивных пучков ионов металлов и газов

Метод ионной имплантации обеспечивает возможность контролируемого изменения микроструктуры, элементного состава и свойств приповерхностных слоев различных материалов.

Обычная ионная имплантация происходит за счет облучения поверхности образцов ионами газа или металла с плотностями тока до сотен mA/cm^2 и энергиями ионов 10-100 кэВ. Данные режимы позволяют добиться ионно-легированных поверхностных слоев материала с толщиной, не превышающей доли микрометра [15].

Для задач по формированию глубоко легированных слоев в полупроводниковых материалах используются методы имплантации ионов с высокими (несколько МэВ) и сверхвысокими (несколько сотен МэВ) энергиями ионов [16]. Данные методы являются экономически не выгодными, поэтому используются другие. В случае металлов, при формировании глубоко ионно-легированных слоев, перспективным является метод, основанный на увеличении глубины проникновения атомов за счет их радиационно-усиленной диффузии в твердом теле. Данный метод получил название «высокоинтенсивная» ионная имплантация.

Отличием данного метода является предварительный нагрев имплантируемой поверхности до температуры, ускоряющей диффузию имплантируемой легирующей примеси, что приводит к увеличению толщины модифицированного слоя на порядок и более.

Использование низкоэнергетических ионов в имплантации, дает модифицированные слои с более высокими концентрациями азота и более глубокой диффузией, что приводит к лучшим поверхностным свойствам [15].

Принципы формирования высокоинтенсивных пучков ионов впервые были сформированы коллективом Научной лаборатории высокоинтенсивной имплантации ионов Томского политехнического университета, описанные в работе [7]. В данной статье представлен метод, совмещающий традиционную лучевую и плазменно-иммерсионную имплантации. Система формирования пучка основана на плазменно-иммерсионном извлечении ионов из плазмы, с применением баллистической фокусировки в эквипотенциальном пространстве дрейфа, предварительно заполненном плазмой.

Основные элементы системы формирования пучков: цилиндрический электрод, коллектор, дисковый экран, сеточный электрод, система формирования высокочастотных короткоимпульсных потенциалов смещения отрицательной полярности. Схема системы формирования ионных пучков представлена на рисунке 1.1.

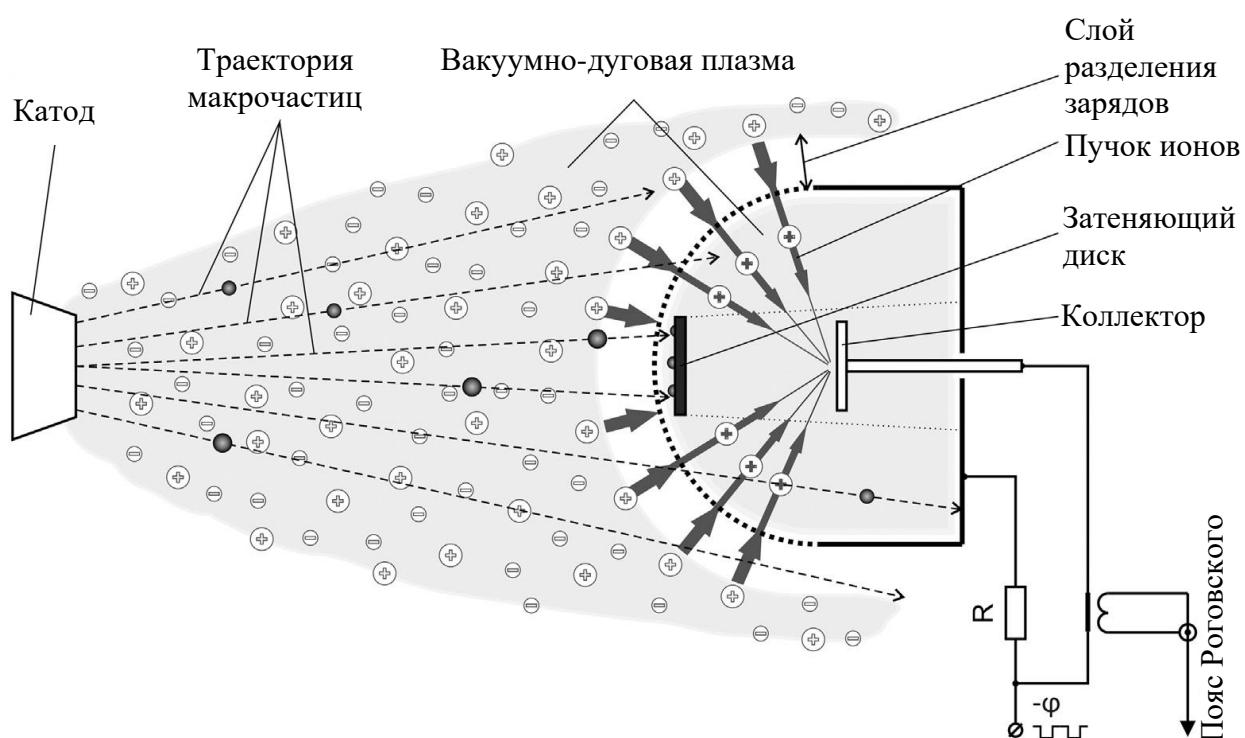


Рисунок 1.1 – Схема формирования высокоинтенсивных пучков ионов металлов низких энергий [7]

Форма невырожденной поверхности второго порядка с центральной симметрией сеточного электрода обуславливает баллистическую фокусировку

потока нормально ускоренных относительно поверхности сеточного электрода частиц, в фокус. Фокус располагается в геометрическом центре сферы и направлен на коллектор. Конструкция из сплошного металлического цилиндрического электрода и сеточного электрода создает объем, ограничивающий эквипотенциальное пространство для транспортировки ионного пучка. С противоположной стороны от сеточного электрода располагается коллектор и датчики. Импульсный потенциал смещения, прикладываемый одновременно к коллектору, сплошному цилиндрическому и сеточному электродам, обеспечивает ускорение и транспортировку в эквипотенциальном пространстве дрейфа ионов.

Для формирования плазмы использовался вакуумно-дуговой разряд. Недостатком данного способа формирования плазмы является образование значительного потока макрочастиц (продукты эрозии катода [17], размерами от долей микрометров до десятков микрометров), вследствие взрывных эмиссионных процессов на титановом катоде. Макрочастицы загрязняют обрабатываемые поверхности, что приводит к снижению технологических возможностей системы формирования ионных пучков. Чтобы нивелировать попадание макрочастиц на обработанную ионным пучком поверхность область подложки, в работе [7] был применен эффект «солнечного затмения» в области фокусировки, представляющий собой металлический экран препятствующий осаждению макрочастиц вакуумной дуги. Металлический экран (затеняющий диск) установлен на сеточном электроде вдоль оси источника плазмы (Рисунок 1.1). Эмитируемые с катода макрочастицы в область коллектора, с практически прямолинейными траекториями движения, задерживаются данным экраном. В то время как ионы пучка, благодаря баллистической фокусировке сферического сеточного электрода, беспрепятственно достигают облучаемой области мишени на коллекторе по прямолинейным траекториям. Результаты экспериментов представленных в работе доказали отсутствие макрокро частиц на поверхности подложки в области следа ионного пучка при использовании эффекта «солнечного затмения». Рисунок 1.2 демонстрирует накопление макро частиц на

подложке вблизи фокальной плоскости системы, как с эффектом «солнечного затмения», так и без него.

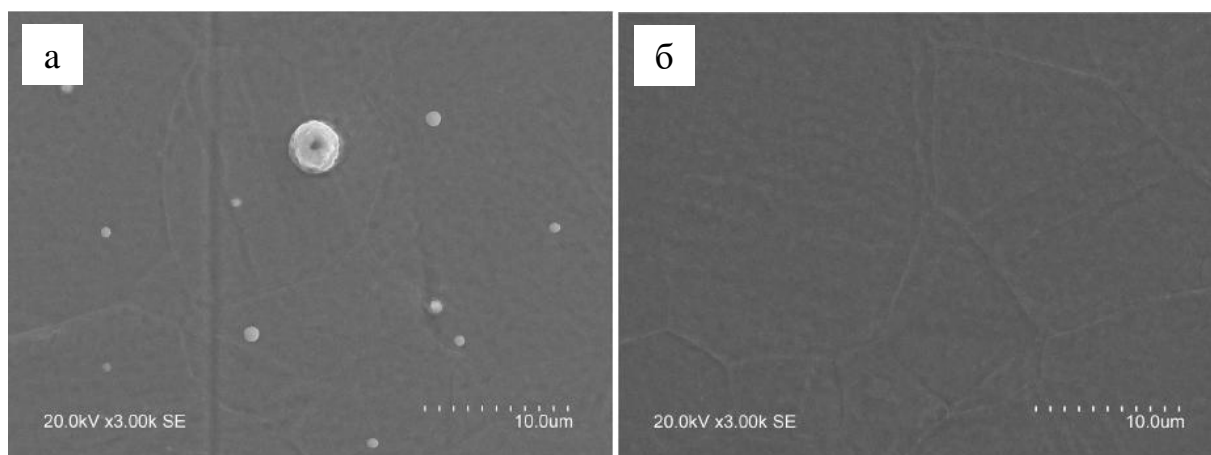


Рисунок 1.2 - СЭМ-изображения поверхности подложки после воздействия ионного пучка (а) без и (б) с системой разделения макрочастиц [7]

Проведенные серии экспериментов выявляли особенности формирования высокоинтенсивных пучков ионов титана в зависимости от: радиуса сеточного электрода, расстояния от коллектора до сеточного электрода (область дрейфа пучка), амплитуды потенциалов смещения и продолжительности импульса потенциалов смещения на сеточный электрод. Результаты экспериментов показали, что лучшие условия для формирования ионного пучка достигнуты при расположении коллектора в фокусе системы, с максимальной амплитудой тока при максимальном ускоряющем напряжении, приложенном на сеточный электрод.

Также данная работа продемонстрировала возможность формирования пучков ионов титана низкой энергии, при высокой плотности тока до 1 A/cm^2 . При изменении радиуса сеточного электрода от 7.5 до 10.5 см зафиксировано уменьшение амплитуды ионного тока в зависимости от продолжительности импульсов потенциала смещения. Это также обусловлено ухудшением эффективности транспортировки пучка в пространстве дрейфа при больших расстояниях. Это предположение стало основой серии работ по формированию

высокоинтенсивных пучков ионов титана с длительностью импульса до 30 мкс [18].

В работе [9] по низкоэнергетической высокоинтенсивной имплантации ионов алюминия в никель, благодаря плазменной иммерсионной экстракции, в сочетании с дальнейшей баллистической фокусировкой ионов, периодические пучки с максимальной плотностью 15 мА/см^2 не содержали макрочастиц. Это говорит о том, что добиться отсутствия макрочастиц можно при помощи фокусировки пучка.

1.2. Формирование аксиально-симметричных пучков ионов азота

В работе [19] описывается формирование высокоинтенсивных пучков ионов азота низкой энергии в легированную сталь AISI 5140 (аналог стали 40X). Плазменно-иммерсионное извлечение ионов из границы плазмы, их ускорение в высоковольтной оболочке и формирование пучка с высокой плотностью тока за счет баллистической фокусировки лежат в основе комбинированного метода формирования высокоинтенсивных пучков ионов азота. Фокусировка ионных пучков производится в условиях частичной или полной нейтрализации объемного заряда при их транспортировке в замкнутом эквипотенциальном дрейфовом пространстве смещенного электрода.

Система баллистической фокусировки и транспортировки пучка погружена в плазму. Ионы, извлеченные из плазмы, ускоряются в высоковольтной оболочке и собираются перед сетчатым электродом при приложении отрицательного смещения. Экстрактором ионов в данном случае является сетчатый электрод. Проходя через него, ионы попадают в дрейфовое пространство и направляются к мишени (коллектору).

Эффективность фокусировки и транспортировки высокоинтенсивных ионных пучков зависит от условий нейтрализации пространственного заряда. Нейтрализация баллистически сфокусированного пространственного заряда ионного пучка проводилась инъекцией плазмы в дрейфовое пространство между импульсами смещения и ионизацией остаточного газа ионным пучком.

Высокоинтенсивная имплантация азота 1,2 кэВ характеризовалась значительным ионным распылением поверхности мишени. Максимальная глубина кратера на поверхности образца совпадала с максимальным распределением плотности тока ионного пучка. Глубина кратера имеет прямую зависимость от температуры исследуемого образца, рисунок 1.3 [19].

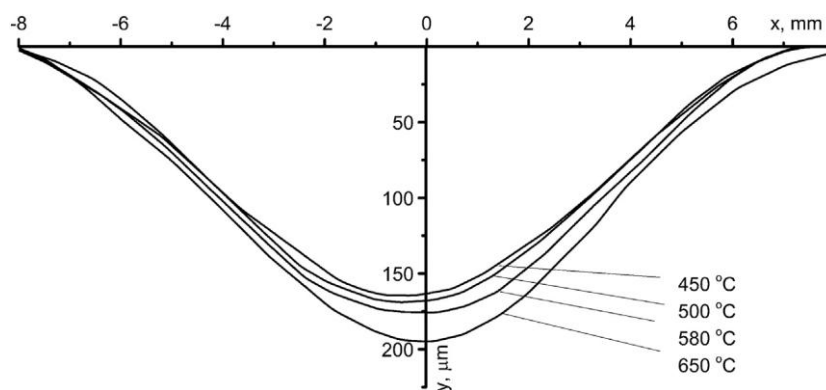


Рисунок 1.3 - Поперечные профили модифицированных поверхностей образцов в области максимальной глубины кратера после ионного распыления

Результаты исследования данной работы показали, что глубина модифицированного слоя в конструкционной стали AISI 5140 при высокоинтенсивной ионной имплантации составляла десятки и сотни микрометров. Максимальная глубина легированного слоя азота наблюдалась в образце при температуре имплантации 500°C и достигала 180 мкм. Причем, не в центре области имплантации ионного пучка с максимальной плотностью тока 0.5 А/см², а на расстоянии 4 мм от центра при плотности тока 0.3 А/см². В центре глубина проникновения азота составляла 100 мкм, что на 45 процентов меньше максимальной глубины. При увеличении расстояния от центра кратера с 6 мм до 8 мм, глубина модифицированного слоя уменьшалась и составляла 160 и 140 мкм соответственно.

При температурах имплантации 450 и 580°C, расстояние от центра образца менее влияло на толщину азотированного слоя. Однако при температуре 650°C максимальная концентрация азота у поверхности упала с 15 до 3-5 ат.%, при максимальной глубине легирования не более 10 мкм.

Следовательно, на формирование глубоких ионно-модифицированных слоев влияет температура мишени, определяющая диффузию азота в материале. При повышении температуры с 450 до 500°C увеличивается глубина проникновения азота и толщина модифицированного слоя. Однако в противовес работает процесс ионного распыления. То есть, толщина ионно-распыленного слоя в центре мишени сопоставима, а иногда и превышает, ширину ионно-модифицированного слоя.

При формировании высокоинтенсивных ионных пучков газа происходит ионизация газа ионами пучка, с образованием «пучковой плазмы». Данный процесс является решением проблемы нейтрализации пространственного заряда пучка и позволяет получить стабильные ионные пучки. Это означает, что при формировании пучков ионов газа предварительная инжекция плазмы в дрейфовое пространство не требуется.

Необходимо, чтобы выход электронов плазмы из ионного пучка в высоковольтный слой через ячейки сетки не приводил к декомпенсации объемного заряда пучка из-за непрерывной ионизации пучка газа [20].

1.3. Формирование ленточных пучков

Также помимо аксиально-симметричного пучка, применяются ленточные пучки. Ленточные пучки используются для ионно-лучевой обработки плоских протяженных деталей и изделий.

Разница при формировании ленточного от остро сфокусированного аксиально-симметричного пучка состоит в использовании сеточного электрода выполненного в виде цилиндрической части. Данная геометрия фокусирующего электрода позволяет добиться меньшей плотности ионного тока в фокальной плоскости и обеспечивает формирование ленточного ионного пучка длиной около 25 см, ограниченной областью однородной плазмы, создаваемой источником «ПИНК» [20]. Полученные таким образом ленточные пучки обладают высокой стабильностью, по длительности импульса и по амплитуде ионного тока.

На рисунке 1.4 представлено распределение плотности ионного тока по сечению пучков ионов азота для обоих типов ионно-экстракционных систем.

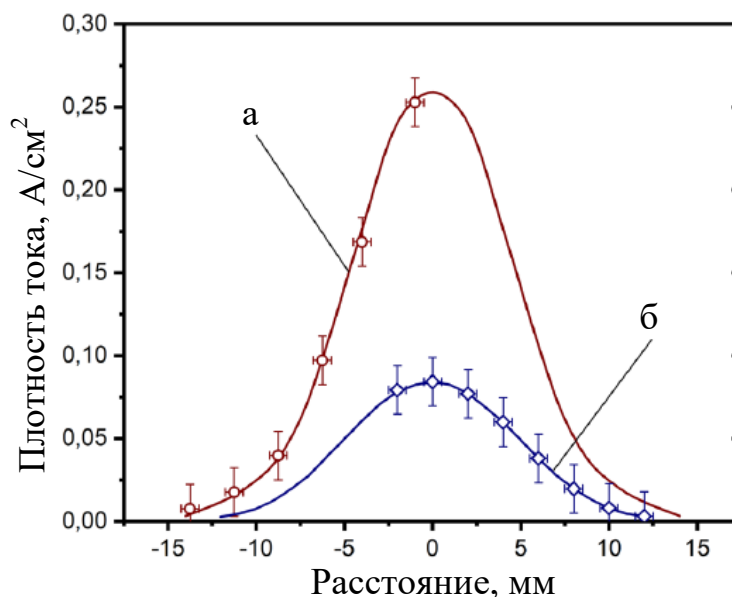


Рисунок 1.4 - Радиальное распределение плотности ионного тока по поперечному сечению пучка азота для (а) аксиально-симметричного ионного пучка, сформированного при амплитуде потенциала смещения 1,2 кВ, и (б) ленточного ионного пучка, сформированного при амплитуде потенциала смещения 0,9 кВ

Исходя из вышеописанных данных, максимальная плотность ионного тока составляет 0.26 А/см^2 , при использовании сеточного электрода выполненного в виде части сферы и 0.08 А/см^2 для цилиндрической геометрии соответственно [20].

Помимо этого площадь ионного пучка в фокальной плоскости сферической системы не превышает 1 см^2 , в то время как цилиндрическая геометрия позволяет формировать однородные протяженные ионные пучки с площадью поперечного сечения в несколько десятков квадратных сантиметров, что может иметь потенциальное применение в методе высокоинтенсивной ионной имплантации низких энергий.

Статья [21] демонстрирует возможность формирования протяженных импульсно-периодических пучков ионов газа малых энергии с высокой

плотностью тока. Впервые была показана возможность формирования ленточного пучка азота высокой плотности при использовании системы формирования с сеточным электродом, выполненным в виде части цилиндра. Также использовался модифицированный протяженный источник дугового разряда с горячим катодом. В экспериментах наблюдалось обратное изменение амплитуды тока сфокусированного ионного пучка по отношению к исходным плотностям плазмы азота. Это было связано с влиянием атомной массы ионов и плотностью плазмы на формирование высоковольтной оболочки вблизи сеточного электрода, соотношением ширины оболочки и размерами ячейки сетки.

Статья [22] так же описывает использование системы формирования с использованием сеточного электрода, выполненного в виде части цилиндра. Эксперименты по имплантации ионов азота низкой энергии проводились с нержавеющей сталью AISI 321 (аналог 12X18H10T). В результате часовой обработки, было получено увеличение показателей микротвердости поверхности в 2.5 раза, однако поверхность подверглась интенсивному ионному распылению с образованием кратеров. Максимальная твердость поверхности была достигнута на периферии кратера, что может быть связано с локальной плотностью ионного пучка и локальной температурой поверхности образца.

1.4. Влияние температуры на глубину распределения примеси.

В статье [23] при использовании низкоэнергетической сильноточной имплантации ионов азота, была улучшена микротвердость нержавеющей стали AISI 5140 стали в 2 раза, после обработки в течение часа. Помимо этого образовался модифицированный слой толщиной до 200 микрон, а также износостойкость была увеличена в 7,5 раз, при условии сохранения исходной твердости (отсутствие термического отпуска).

Статья показывает, что при использовании сильноточной имплантации ионов азота низких энергий, можно регулировать температуру образца изменяя

скважность импульса смещения, не изменяя значения амплитуды смещения или тока разряда.

В этой работе была проведена обработка при одних и тех же параметрах пучка, но при различных температурах поверхностей мишеней (450 °С, 500 °С, 580 °С и 650 °С). В результате было продемонстрировано, что максимальная концентрация и глубина проникновения примеси наблюдается при температуре 500 °С и достигает 15 ат.% и 180 мкм соответственно. Однако при обработке 650 °С концентрация примеси азота составляет 3-5 ат.% с глубиной проникновения примеси не превышающей 10 мкм. Исследование обработанных образцов показало, что эффективность насыщения азотом определяет температура.

1.5. Распыление твердого тела ионным пучком

В статье [25], рассмотрена обработка образцов титанового сплава ВТ1-0 пучками ионов азота, сформированные при ускоряющем напряжении до 2 кВ, токе разряда 50 А и коэффициенте заполнения 40%. Было показано, что при имплантации в течение часа импульсными низкоэнергетическими пучками ионов азота, поверхность подвергается интенсивному ионному распылению, с образованием кратеров, которое зависит от параметров ионного пучка. Максимальная глубина кратера достигает 25 мкм при коэффициенте заполнения 80% и токе разряда 20А. При увеличении скважности импульса глубина кратера увеличивается, а ширина уменьшается.

Однако твердость поверхности увеличилась от полутора до двух с половиной раз. Максимальная твердость поверхности достигается не в центре кратера распыления, а на его краях. Это зависит от локальной плотности ионного пучка и температуры поверхности образца.

Статья [26] доказывает, что при имплантации ионов азота низких энергий (АISI 321) поверхность образцов подвергается ионному распылению, что приводит к образованию кратера, профиль которого зависит от эффективности фокусировки и энергии ионного пучка. Однако, при

использовании данных параметров, за час обработки, твердость поверхности увеличивается до четырех раз. Это происходит за счет образования модифицированного слоя на поверхности образца, толщиной до 50 мкм, содержащего нитриды железа и хрома. Было доказано, что максимальная твердость достигалась не только на краях кратера, но и в центре.

Анализ параметров обрабатываемой поверхности образца, таких как глубина кратера и толщина модифицированного слоя, позволяет утверждать, что при имплантации ионов азота низких энергий, даже в интервале энергий ионов азота более чем на порядок больше порога распыления материала мишени, можно создать условия, когда увеличение плотности ионного тока приводит к увеличению толщины модифицированного слоя, несмотря на повышение эффективности ионного распыления.

Статья по модификации нержавеющей стали методом высокоинтенсивной имплантации ионов азота [27] низких энергий показала влияние неоднородности радиального распределения плотности ионного тока по сечению пучка с диапазоном $0.08-0.25 \text{ А/см}^2$ на образование кратера распыления поверхности образца. Аналогичное влияние проявляется на глубину азотирования и микротвердость модифицированного слоя.

Многokратное увеличение плотности ионного тока способствует увеличению коэффициента и скорости диффузии имплантированных атомов вглубь поверхности образцов. Противоположным фактором является пропорционально увеличивающееся ионное распыление поверхности. Полученные профили поперечного сечения поверхностей образцов показывают, что глубина кратера увеличивается с увеличением времени и, соответственно, плотности энергии облучения образца.

В тоже время, снижение плотности тока ионов азота с 0.25 до 0.08 А/см^2 , привело к увеличению толщины модифицированного слоя.

Следовательно, основным фактором влияющим на глубину диффузии легирующей примеси, является высокая плотность ионного тока, а не энергия ионов.

При сверхвысокой дозе высокоинтенсивной имплантации ионов азота в высокохромистую мартенситную сталь в течении часа при 500°C, позволила сформировать модифицированный слой толщиной до 90 мкм [28]. Так же было установлено, что средний размер частиц нитридных фаз составляет 40-50 нм, что указывает на высокодисперсную структуру модифицированного слоя. Микротвердость приповерхностного слоя стали AISI 420, хорошо коррелирует с распределением азота по глубине мишени, а максимальная микротвердость наблюдается в поверхностном слое металла.

Выводы по главе «Общий обзор состояния исследования высокоинтенсивной ионной имплантации»

В литературном обзоре были рассмотрены: принципы формирования высокоинтенсивных пучков ионов металлов и газов, формирование аксиально-симметричных и ленточных пучков ионов азота, влияние температуры на глубину распределения примеси, а также распыление твердого тела ионным пучком.

Была показана возможность формирования высокоинтенсивных пучков ионов металлов и газов с энергией ионов до единиц кэВ, при использовании системы формирования с сеточным катодом, выполненным в виде части сферы. Приведена возможность формирования как аксиально-симметричных, так и ленточных ионных пучков с плотностями тока до сотен мА/см². Также показана зависимость эффективности имплантации от температуры мишени.

Продемонстрировано основное ограничение применимости данного метода, которая связана с существенным ионным распылением при воздействии высокоинтенсивных пучков ионов металлов и газов низких энергий. При определенных условиях толщина распыленного слоя может достигать десятком и сотен микрон и даже превышать толщину модифицированного слоя.

Применение методов высокоинтенсивной ионной имплантации низких энергий для модификации внутренних поверхностей отверстий ранее не

описывалось. Проведенный обзор позволяет провести исследование закономерностей модификации внутренних поверхностей отверстий с помощью высокоинтенсивных импульсно-периодических пучков ионов азота низких энергий.

2. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1. Экспериментальная установка

Исследования по применению высокоинтенсивной имплантации ионов азота низкой энергии для обработки внутренних поверхностей отверстий деталей проводились на комплексной технологической установке для ионно-лучевой и ионно-плазменной обработке материалов.

Данная комплексная установка состоит из: вакуумной камеры, форвакуумного пластинчато-роторного насоса, высоковакуумного турбомолекулярного насоса, системы контроля степени вакуума, системы формирования высокоинтенсивных пучков ионов, источника плазмы и системы детектирования сигналов.

Для проведения эксперимента необходимым условием является создание высокого вакуума. Для этих целей использовалась система откачки, состоящая из двух вакуумных насосов. Предварительная откачка осуществлялась форвакуумным масляным пластинчато-роторным насосом «ВАКМА 2НВР-5ДМ» производительностью пять литров в секунду. Основная откачка производилась высоковакуумным турбомолекулярным насосом модели «КУКУ FF-160/700Е» производительностью 700 л/с. Для достижения рабочего давления в камере дополнительно использовались затвор и вакуумные клапаны, согласно инструкции. Давление в вакуумной камере контролировалось ионизационным и двумя термопарными вакуумметрами. В результате чего, остаточное давление атмосферы в вакуумной камере до начала экспериментов составляло 10^{-3} Па.

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2.1.

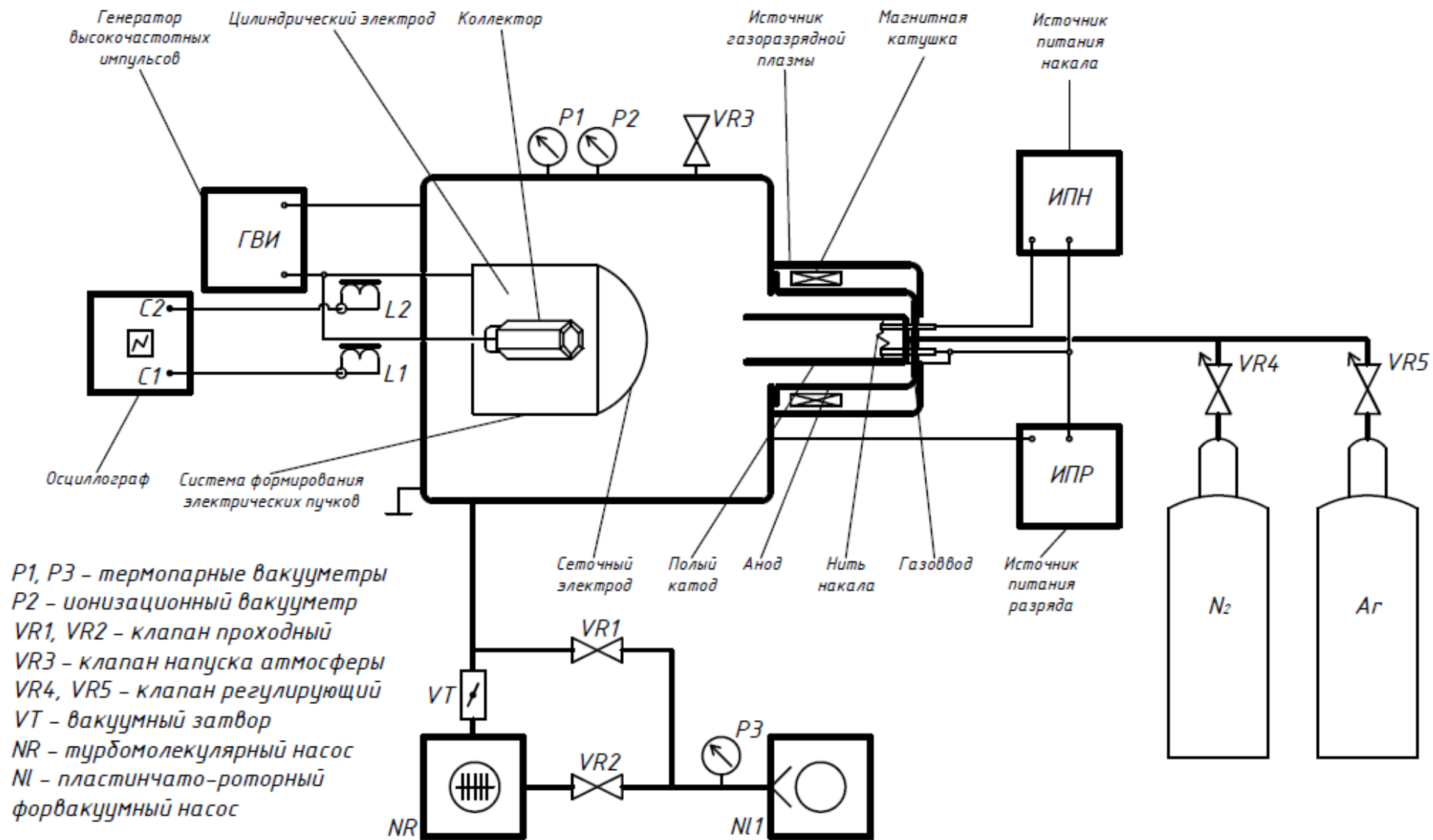


Рисунок 2.1 – Схема экспериментальной установки

2.2. Источник газовой плазмы

В эксперименте проводилась обработка внутренних поверхностей отверстий высокоинтенсивными пучками ионов азота низкой энергии. Генератором газовой плазмы в экспериментальной установке служит плазменный источник непрерывной газоразрядной плазмы с накалимым катодом «ПИНК» на основе несамостоятельного дугового разряда, схема которого представлена на рисунке 2.2.

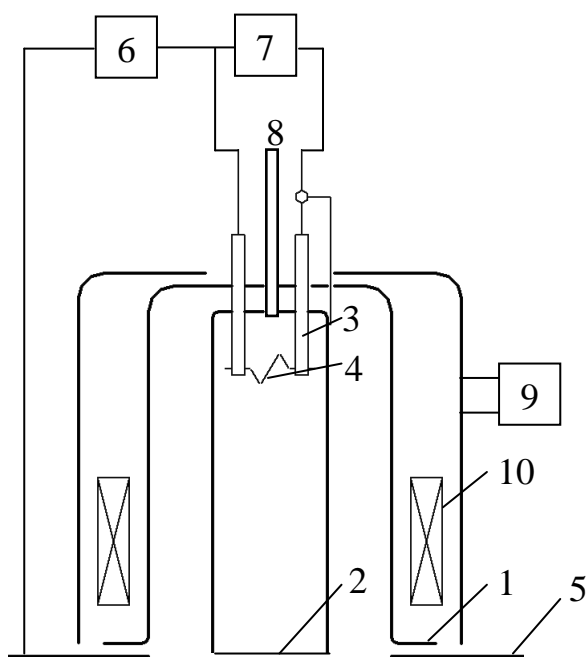


Рисунок 2.2 – Схема плазмодгенератора «ПИНК»

1 - водоохлаждаемый корпус плазмодгенератора, 2 - цилиндрический полый катод, 3 – электроввод, 4 - накалимый катод, 5 - анод (стенки вакуумной камеры), 6 - источник питания разряда, 7 - источник питания накала, 8 - газовый ввод, 9 - источник питания магнитной катушки, 10 – магнитная катушка

В основе работы плазменного источника с накалимым катодом «ПИНК» лежит использование несамостоятельного дугового разряда с комбинированным катодом, состоящим из цилиндрической полости и расположенного в ней накалимого катода, помещенных в продольное

магнитное поле. Стабилизация разряда и фокусировка разрядной плазмы обусловлена магнитной системой.

Водоохлаждаемые электроды питания прямоканального катода смонтированы внутри водоохлаждаемого корпуса плазмогенератора. Анодом выступают стенки вакуумной камеры. Цилиндрический полый катод закреплен на вакуумной стороне корпуса.

Катод представляет собой вольфрамовую проволоку длиной 180 мм и диаметром 2 мм. Катодный узел находится под катодным потенциалом и изолирован от корпуса плазмогенератора диэлектрическим фланцем. Подача рабочего газа в плазмогенератор осуществляется штатным натекателем через газовый ввод.

Накаленный катод испускает электроны, которые двигаются по направлению к аноду (заземленные стенки вакуумной установки), вдоль силовых линий магнитного поля. В районе накаленного катода формируется область повышенного давления, причиной этого служит напуск рабочего газа в катодную полость с давлением 10^{-1} Па. При низких давлениях в камере, области повышенной концентрации молекул с потоком ускоренных электронов значительно упрощают разжигание и горение несамостоятельного дугового разряда.

Разряд, возникающий между катодом (накаленная нить с катодной областью) и полым анодом, площадь которого равна площади внутренней поверхности вакуумной камеры, генерирует плазму. Плазма распространяется по анодной полости, образуя рабочую среду для обработки поверхностей.

2.3. Система формирования высокоинтенсивных ионных пучков

Полученную плазму необходимо сфокусировать, для проведения дальнейших экспериментов. Плазменно-иммерсионная экстракция ионов и их баллистическая фокусировка осуществляется системой формирования ионных пучков.

Система формирования высокоинтенсивных пучков состоит из сеточного электрода соединенного с цилиндрическим электродом, который служит для обеспечения замкнутого эквипотенциального пространства в области дрейфа пучка. Сеточный электрод выполнен в виде невырожденной поверхности второго порядка. Данная форма обеспечивает баллистическую фокусировку пучков ионов газов. На рисунке 2.3 [20] изображена общая схема формирования и фокусировки высокоинтенсивных ионных пучков.

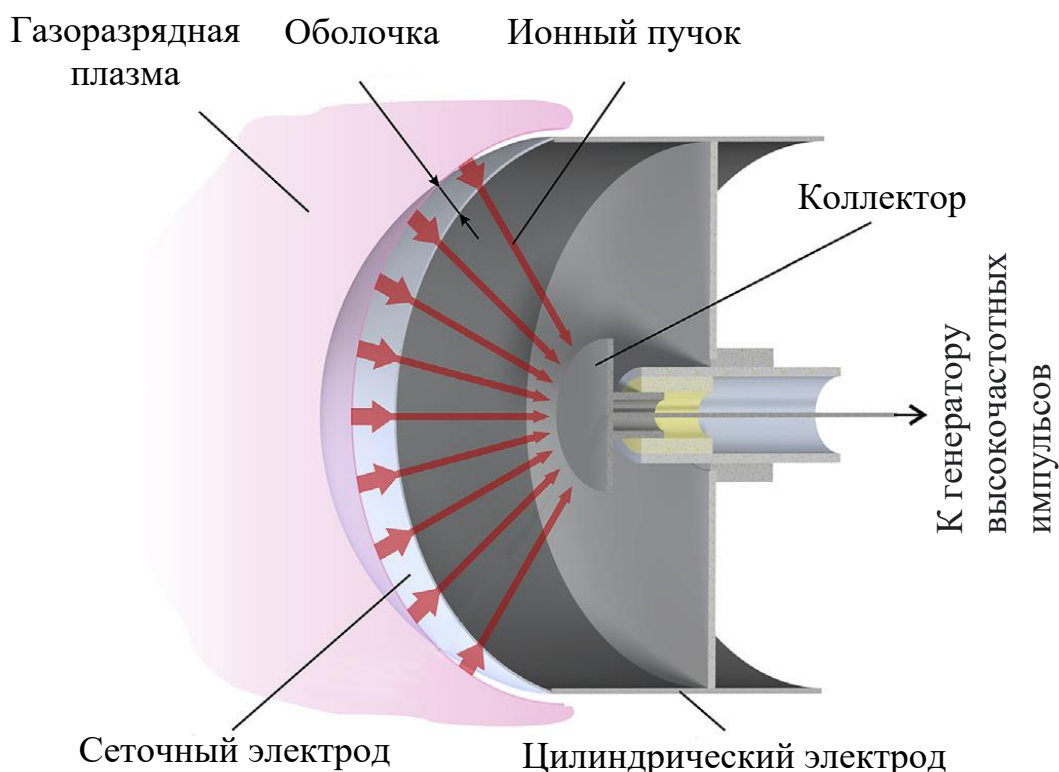


Рисунок 2.3 – Общая схема системы формирования высокоинтенсивного пучка

Плазменно-иммерсионное извлечение и ускорение ионов плазмы в высоковольтной оболочке с последующей их баллистической фокусировкой в пространстве эквипотенциального дрейфа лежит в основе формирования импульсно-периодических высокоинтенсивных пучков ионов газа [7].

Сеточный электрод, выполненный в виде невырожденной поверхности второго порядка радиусом 10 см, осуществляет извлечение и фокусировку пучка. Прозрачность сеточного электрода составляет 50%, размер ячеек 0.5×0.5 мм². Сеточный электрод установлен на конце цилиндрического электрода.

На противоположном конце цилиндрического электрода расположен коллектор, выполненный в виде шестиугольной призмы. Данная форма позволяет имитировать отверстие некой детали, предотвращает деформации при последующем изучении образцов. Рабочая плоскость коллектора располагается на расстоянии 12 см, вдоль оси фокусирующей системы в геометрическом фокусе сеточного электрода. Система формирования высокоинтенсивного пучка погружалась в газоразрядную плазму на расстоянии 11 см от источника плазмы.

Трехмерная модель системы формирования изображена на рисунке 2.4.

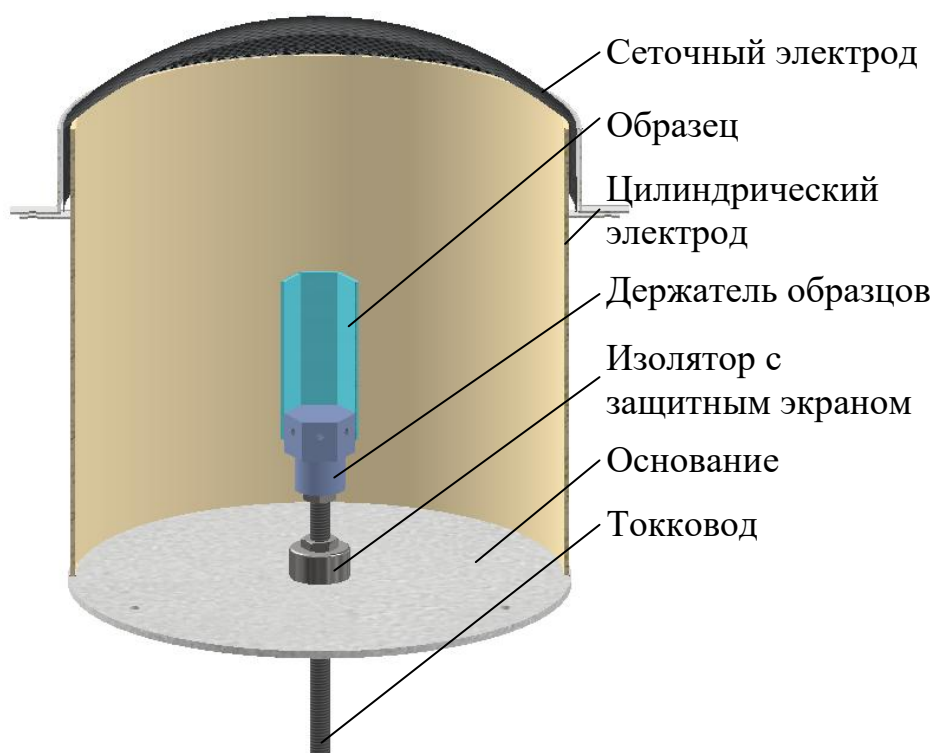


Рисунок 2.4 – Трехмерная модель системы формирования высокоинтенсивных пучков ионов газов низких энергии с разработанным держателем образцов

Для формирования ионного пучка использовался генератор высокочастотных импульсов с напряжением смещения отрицательной полярности. Эксперименты выполнялись при частоте импульсов смещения 40 кГц, длительности импульса 10 мкс, коэффициенте заполнения импульса 40%. Амплитуда потенциала смещения была равна минус 1.4 кВ.

2.4. Разработка коллекторного узла для проведения экспериментов

Одна из задач данной выпускной квалификационной работы состоит в изучении новых вариантов использования высокоинтенсивных ионных пучков низких энергий. Было принято решение исследовать применение данных методов при обработке внутренних поверхностей отверстий. Коллектор, используемый в лаборатории, не подходил для этой цели. В связи с чем возникла необходимость создания коллекторного узла новой формы.

При создании коллекторного узла, необходимо было учесть особенности эксперимента. А именно, имитацию внутренней поверхности отверстия. Также требовалось, чтобы подготовка образцов не вызывала дополнительных затрат труда, а установка не вызывала сложностей. Помимо этого, данный узел должен был облегчить исследования образцов после проведения экспериментов.

Первичной задачей при создании коллектора является форма, способная имитировать внутреннюю поверхность отверстия. Для этого самым простым способом является использование образца в виде полого цилиндра. Однако данная форма образца имеет свои недостатки: затруднения при подготовке образца, сложности при исследовании внутренней поверхности. Это означало бы, что образец необходимо разрезать на равные части для проведения исследований. Полученные образцы имели бы форму части полого цилиндра, что значительно усложняло исследование. Таким образом, максимально удобной для исследований формой являются образцы, выполненные в виде прямоугольных пластин.

Использование образцов в виде пластин, требует определенную форму основания коллектора. Это означает, что в основании коллектора должна лежать правильная призма. Наиболее соответствующим основанием для создания коллекторного узла, имитирующего отверстие, подходит шестиугольник. Это означает, что для проведения исследования необходимо готовить по шесть образцов одинакового размера. Было предложено взять за

длину стороны шестиугольника, ширину образца (14 мм). Это стало отправной точкой при проектировании коллекторного узла.

В качестве материала для коллектора была выбрана нержавеющая сталь. Разработка началась с создания чертежей в программе Inventor 2020. Помимо определения формы основания коллектора, так же требовалось продумать подключение токоввода и крепление образцов. Эти требования повлияли на конечный вид коллектора. Трехмерная модель основания коллектора представлена на рисунке 2.5.

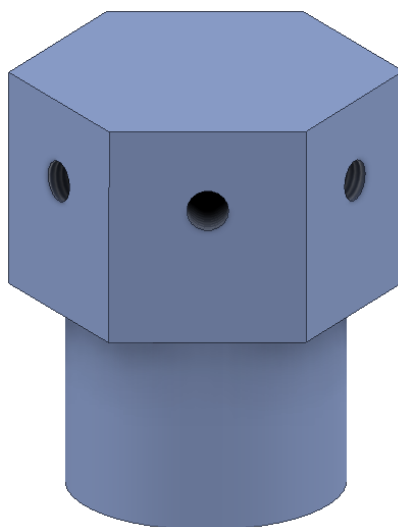


Рисунок 2.5 – Трехмерная модель основания коллектора

Для подключения токоввода к коллектору в его основании просверлено отверстие и нарезана резьба М8. Крепление образцов осуществлялось при помощи болтов М3, для чего на боковых гранях коллектора, были сделаны шесть отверстий с резьбой. Следовательно, образцы имели отверстия диаметром 3 мм.

Трехмерная модель коллекторного узла представлена на рисунке 2.6.

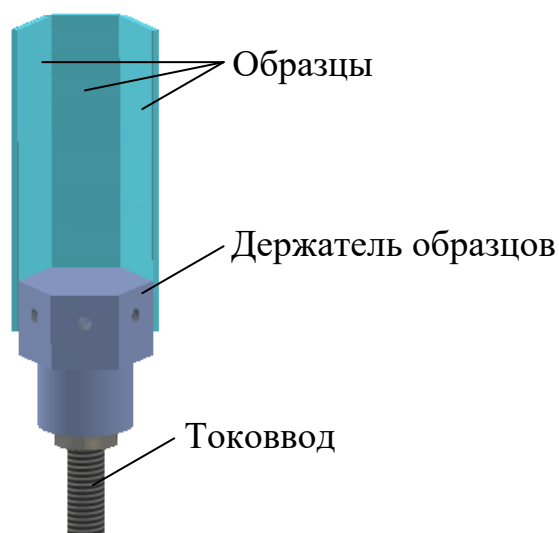


Рисунок 2.6 – Трехмерная модель коллекторного узла

Полученный коллекторный узел полностью отвечает требованиям для исследования модификации высокоинтенсивными ионами азота низкой энергии внутренних поверхностей отверстий. Основание, выполненное в виде правильной шестиугольной призмы и расположение образцов, имитируют условное отверстие. Образцы имеют простую форму, что не вызывает никаких сложностей при их подготовке. Образцы в виде отдельных пластин удобны при исследовании.

Была подготовлена техническая документация на изготовление вышеописанного коллекторного узла, а именно сборочный чертеж коллекторного узла, чертежи для держателя образцов и токоввода, которые представлены в приложениях А, В-Д.

2.5. Подготовка образцов

Материалом образцов для ионной имплантации азота была выбрана конструкционная нержавеющая сталь 12Х18Н10Т.

Начальная подготовка образцов заключалась в нарезке листов стали на пластины размером 14 на 65 мм и толщиной 1.5 мм. Резка образцов проводилась отрезными кругами из карбида кремния (SiC) на станке Brilliant 201 с применением водяного охлаждения (рисунок 2.7).



Рисунок 2.7 – Станок Brilliant 201

Последующим этапом было сверление отверстия диаметром 3 мм, с отступами в 5 и 7 мм от края до центра отверстия на каждом образце. Чертеж для изготовления образцов представлен в приложении Б.

Далее образцы обрабатывались наждачной бумагой с размерами абразива от 40 до 3.5 мкм на шлифовально-полировочной машине Saphir 320 (рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 – Шлифовально-полировальная машина Saphir 320

Окончательная полировка проходит на сукне с использованием алмазной суспензии с размером абразивного зерна до 1 мкм. Среднеарифметическая шероховатость поверхности образцов R_a составляет

примерно 0.25 мкм. Тщательно подготовленная поверхность образца повышает чистоту эксперимента.

2.6. Средства измерения параметров ионного пучка

Параметры импульсного потенциала смещения замерялись с помощью активного делителя напряжения. Для измерения тока ионного пучка использовался пояс Роговского. Импульсы тока и напряжения смещения фиксировались с помощью цифрового четырехканального осциллографа Rigol MS01104. Внешний вид передней панели осциллографа представлен на рисунке 2.9.



Рисунок 2.9 – Внешний вид осциллографа Rigol MS01104

Пояс Роговского используется для контроля системы и токов коллектора. Чтобы исключить влияние вторичной электронной эмиссии, выходы ионно-электронной эмиссии измерялись в плазменно-иммерсионном режиме при различных ускоряющих напряжениях и, в свою очередь, полученные значения тока в конкретной системе формирования ионного пучка нормировались относительно вторичной эмиссии. Дополнительный метод контроля тока был связан с использованием высокоскоростного пирометра, который измерял температуру поверхности коллектора, и последующего

сравнения измеренной и прогнозируемой температуры, полученной с помощью расчетов [20].

2.7. Методики исследований ионно-модифицированных образцов

Исследования микроструктуры и формы кратеров ионного распыления на поверхности мишеней после ионной обработки высокоинтенсивными пучками ионов азота проводились с помощью оптического бесконтактного трехмерного профилометра «STIL 3D Micromesure». Внешний вид профилометра представлен на рисунке 2.10.



Рисунок 2.10 – Профилометр STIL 3D Micromesure

Для исследования распределения в стали примеси азота по глубине подготавливались специальные поперечные металлографические шлифы. Затем эпоксидной смолой заливались в специальной оснастке. После поперечная поверхность шлифовалась и полировалась. Исследования поверхности образцов и распределения концентрации азота по глубине проводились при помощи растрового электронного микроскопа «Hitachi S-3400 N» с энергодисперсионной приставкой «Bruker XFlash 4010». Внешний вид комплекса представлен на рисунке 2.11.



Рисунок 2.11 – Растровый электронный микроскоп Hitachi S-3400 N

Метод исследования заключается в последовательном измерении концентрации различных примесей в поверхности материала. Измерения проводились с шагом, равным 3.5 мкм, вглубь от поверхности модифицированного слоя. Для статистической достоверности, для каждого шага выполнялось пять измерений.

Выводы по главе «Описание экспериментальной установки и методики эксперимента»

Представлена схема экспериментальной установки, рассмотрены принципы формирования высокоинтенсивных низкоэнергетических пучков ионов азота. Предложена и разработана техническая документация для коллектора альтернативной формы, имитирующая отверстие детали, облегчающая исследование и предотвращающая деформации образцов. Техническая документация приведена в приложениях А-Д. Приведена последовательность подготовки образцов и эксперимента. Представлены методы и оборудование для анализа поверхности образца.

3. ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫМИ ПУЧКАМИ ИОНОВ АЗОТА НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ

3.1. Исследование распределения примеси азота на внутренних поверхностях отверстий

В данной главе описаны результаты исследований метода высокоинтенсивной имплантации ионов азота низкой энергии для обработки внутренних поверхностей отверстий.

Были проведены серии экспериментов. Первая серия проводилась для выяснения эффективности использования метода высокоинтенсивной ионной имплантации пучков азота низких энергий.

При проведении экспериментов использовался коллекторный узел и аксиально-симметричная система формирования пучка, описанные ранее. Основное отличие в экспериментах состоит в повышении тока газового разряда с 30 до 50 А, в следствии чего изменилось и время с 60 до 50 мин соответственно.

В таблице 3.1 приведены режимы экспериментов по обработке внутренних поверхностей отверстий.

Таблица 3.1 – Режимы формирования высокоинтенсивных пучков ионов азота для модификации внутренней поверхности отверстия

Параметры режима	Режим I	Режим II
Ток газового разряда, А	30	50
Время обработки, мин	60	50
Амплитуда потенциала смещения, кВ	-1.4	
Длительность импульса, мкс	10	
Коэффициент заполнения, %	40	
Частота импульсов смещения, кГц	40	
Температура мишени, °С	570	615

Как видно из таблицы 3.1, изменялся ток разряда, время обработки и температура мишени.

Обработанные ионным пучком образцы исследовались при помощи профилометра STIL 3D Micromesure и растрового электронного микроскопа Hitachi S-3400 N. Полученная на растровом электронном микроскопе микрофотография поперечного шлифа образца, модифицированного пучком ионов азота, представлена на рисунке 3.1.

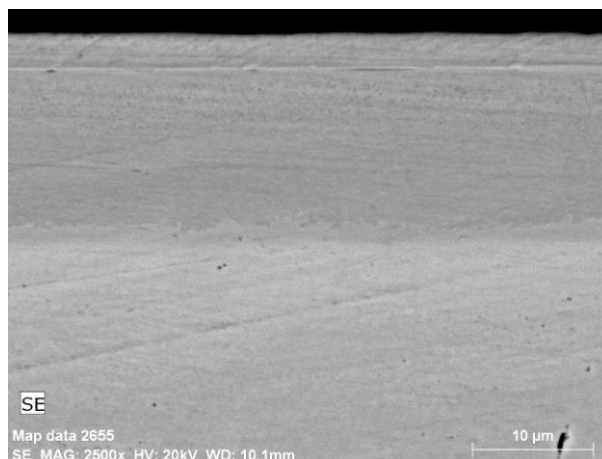


Рисунок 3.1 – Микрофотография поперечного металлографического шлифа образца модифицированного пучком ионов азота, полученном при токе газового разряда 50 А

После чего было выполнено картирование распределения примеси азота в приповерхностном слое модифицированного образца пучком ионов азота, представленное на рисунке 3.2.

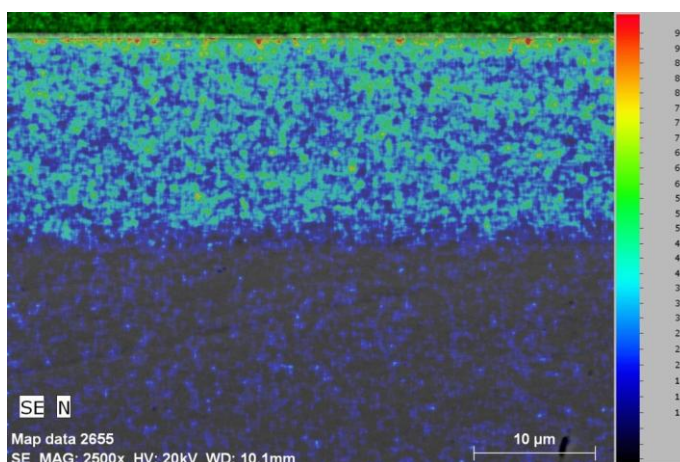


Рисунок 3.2 – Изображение результатов картирования распределения примеси азота в приповерхностном слое модифицированного образца пучком ионов азота, полученном при токе газового разряда 50 А

Графики зависимости концентрации азота от глубины имплантированного слоя, при учете расстояния от края образца вглубь, приведены на рисунках 3.3 и 3.4.

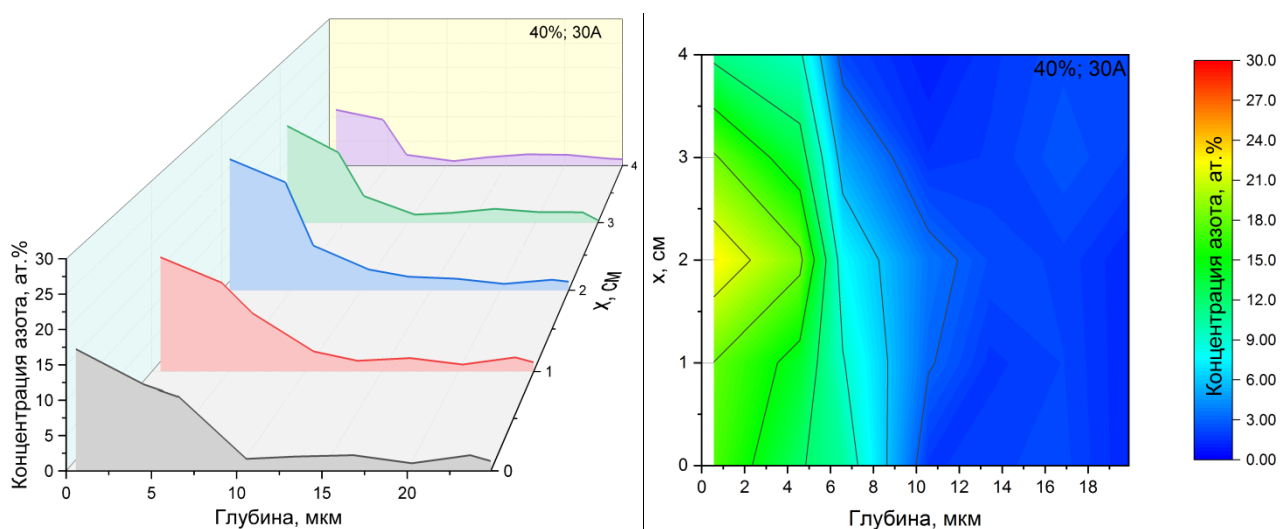


Рисунок 3.3 – Зависимость концентрации азота от глубины имплантированного слоя, при токе газового разряда 30 А

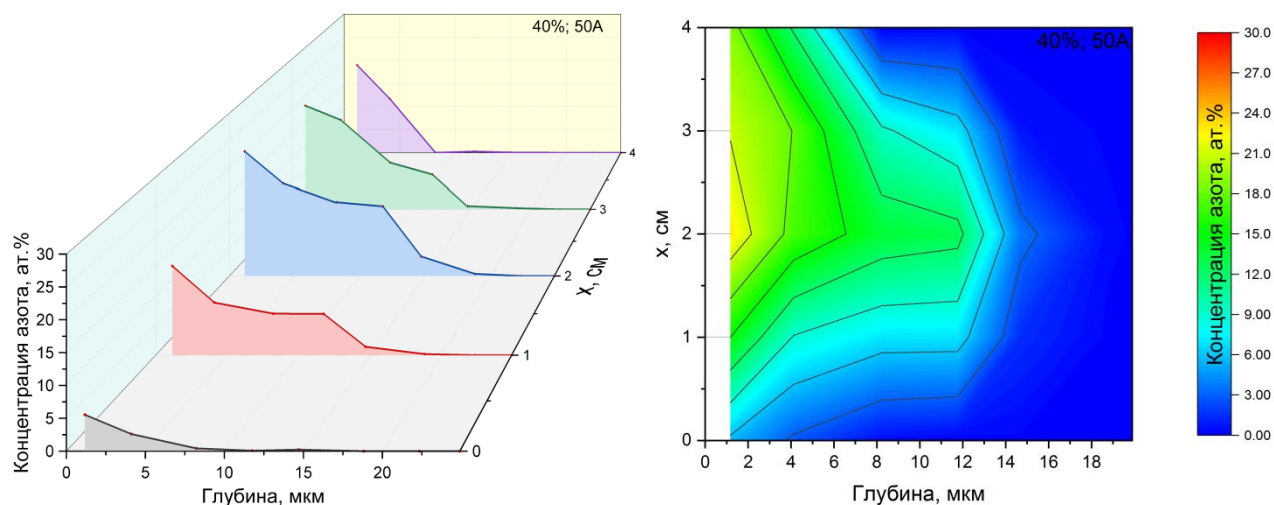


Рисунок 3.4 - Зависимость концентрации азота от глубины имплантированного слоя, при токе газового разряда 50 А

Образцы модифицированные при токе газового разряда 30 А, имеют равномерную глубину на всем имплантируемом участке, достигающую 8 мкм. Максимальная концентрация азота – 22 ат.%, получена в точке фокуса пучка, примерно 2 см от края образца. Область максимального значения глубины имплантации также расположена в зоне фокусировки пучка ионов. За точкой

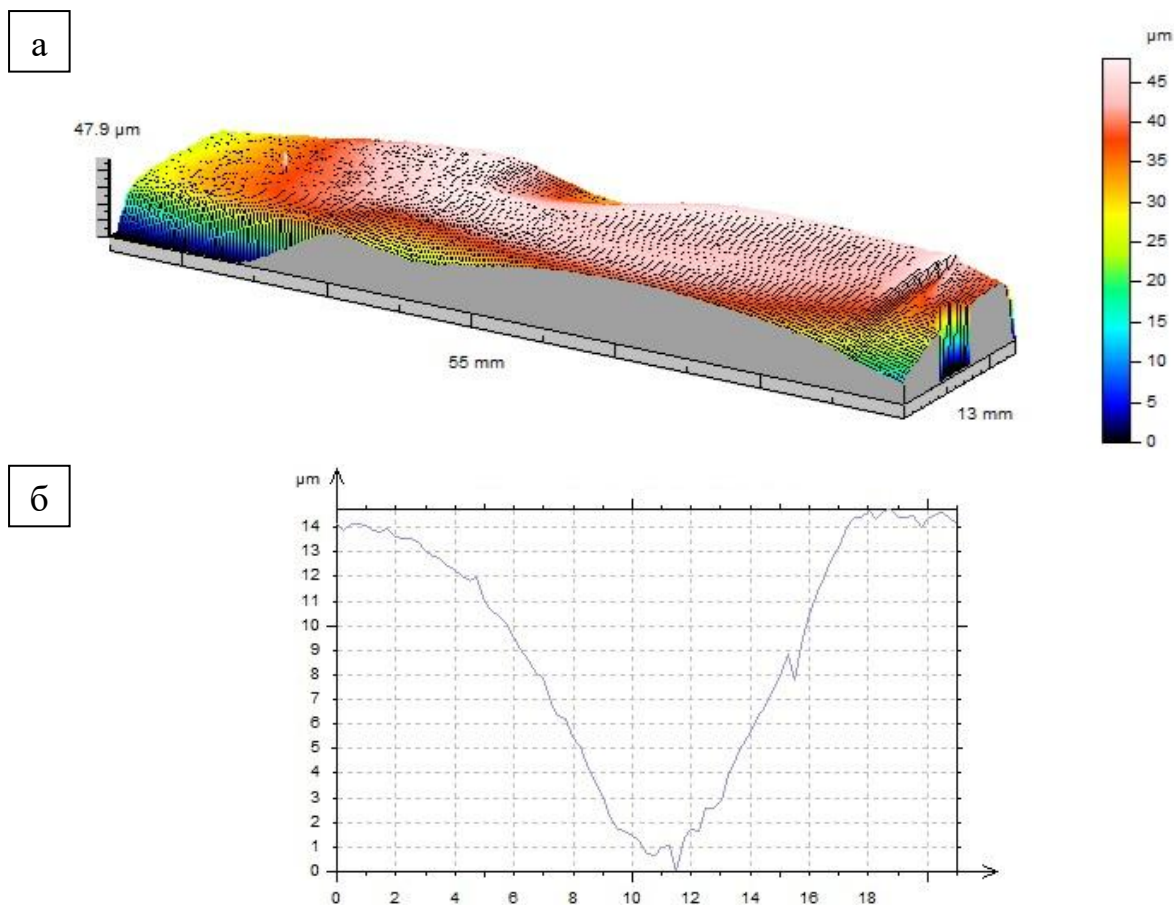
фокуса пучка заметно снижение, как концентрации азота на поверхности материала, так и толщины имплантированного слоя.

При повышении тока газового разряда с 30 до 50 А, увеличивается температура мишени на 45 °С. В этом случае, максимальным значение концентрации азота достигает 23 ат.%, а максимальное значение глубины имплантации увеличено в два раза, с 6 до 12 мкм. Таким образом, при увеличении тока разряда, значительно увеличивается глубина имплантированного слоя, однако уменьшается равномерность, так как концентрация азота от начала образца до полутора сантиметров существенно ниже. Возможно, это связано с изменением условий фокусировки. Также данные совпадают с результатом картирования распределения примеси азота в приповерхностном модифицированном слое образца.

3.2. Исследование влияния ионного распыления при обработке внутренних поверхностей отверстий

Исследования микроструктуры и формы кратеров ионного распыления на поверхности мишеней после ионной обработки высокоинтенсивными пучками ионов азота проводились с помощью оптического бесконтактного трехмерного профилометра «STIL 3D Micromesure».

Изображение поверхности образца модифицированного высокоинтенсивным импульсно-периодическим пучком ионов азота с энергией ионов 1,4 кэВ, длительностью импульса 10 мкс и частотой 40 кГц, полученном при токе газового разряда 30 А представлено на рисунке 3.5.

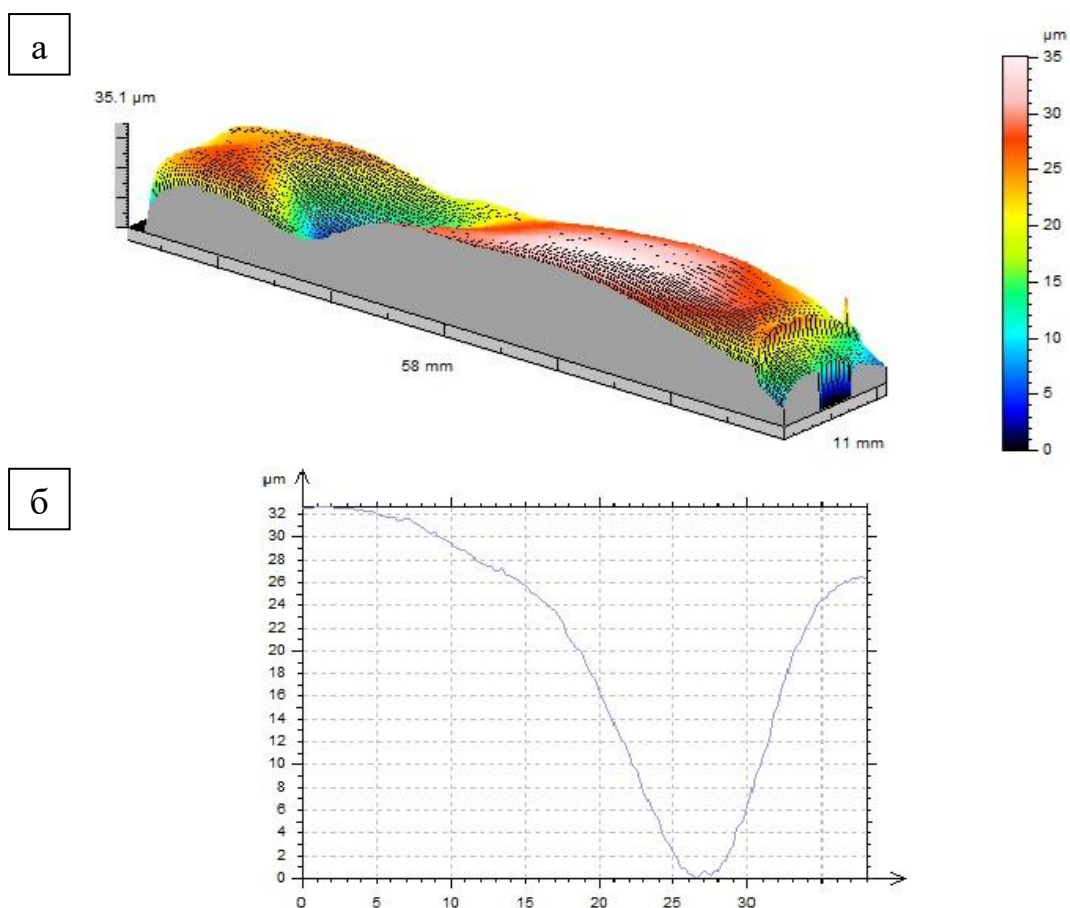


- а) – трехмерное изображение кратера распыления на поверхности образца;
 б) – двухмерный профиль кратера, полученный в случае максимального воздействия пучка.

Рисунок 3.5 – Изображения поверхности образца модифицированного высокоинтенсивным импульсно-периодическим пучком ионов азота с энергией ионов 1,4 кэВ, длительностью импульса 10 мкс и частотой 40 кГц, полученном при токе газового разряда 30 А

На рисунке 3.5 видно, что при модификации высокоинтенсивным импульсно-периодическим пучком ионов азота с энергией ионов 1.4 кэВ, длительностью импульса 10 мкс и частотой 40 кГц, при токе газового разряда 30 А, глубина кратера полученного в случае максимального воздействия пучка, достигает 14 мкм при ширине в 15 мкм.

Изображение поверхности образца модифицированного высокоинтенсивным импульсно-периодическим пучком ионов азота при токе газового разряда 50 А представлено на рисунке 3.6.



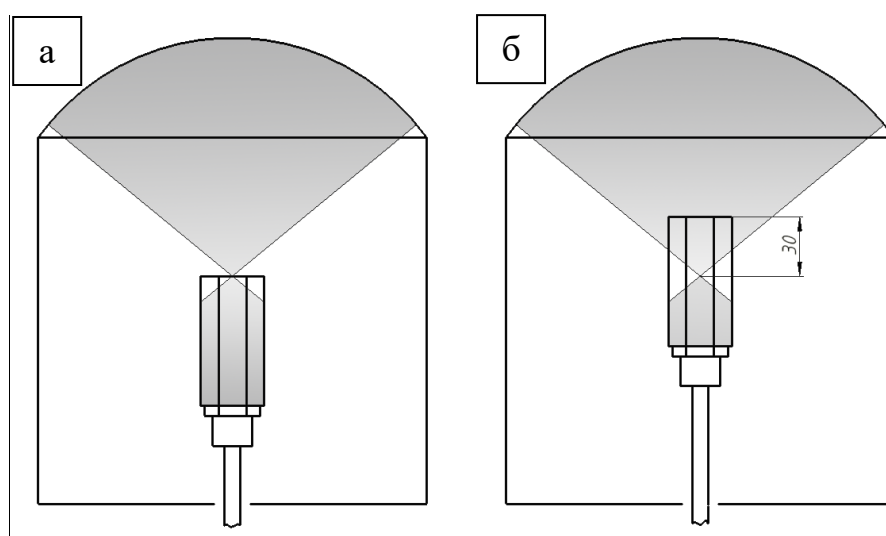
- а) – трехмерное изображение кратера распыления на поверхности образца;
 б) – двухмерный профиль кратера, полученный в случае максимального воздействия пучка

Рисунок 3.6 – Изображения поверхности образца модифицированного высокоинтенсивным импульсно-периодическим пучком ионов азота с энергией ионов 1,4 кэВ, длительностью импульса 10 мкс и частотой 40 кГц, полученном при токе газового разряда 50 А

Повышение тока газового разряда с 30 до 50 А, значительно повлияло на размеры кратера. Глубина достигает 26 мкм, а ширина 22 мкм. Из чего можно сделать вывод, что глубина кратеров имеет прямую зависимость от тока газового разряда.

3.3. Исследование модификации высокоинтенсивными низкоэнергетическими пучками ионов азота внутренних поверхностей отверстий с перемещением фокуса ионного пучка

Для данного исследования была проведена серия экспериментов с различным положением коллекторного узла по отношению к фокусу ионного пучка. Один эксперимент, взятый за эталонный, был проведен с фокусом ионного пучка находящегося у начала образцов (рисунок 3.7а). Во втором эксперименте коллекторный узел был смещен таким образом, чтобы фокус пучка находился в центре образцов (рисунок 3.7б). Схема проведения экспериментов представлена на рисунке 3.7.



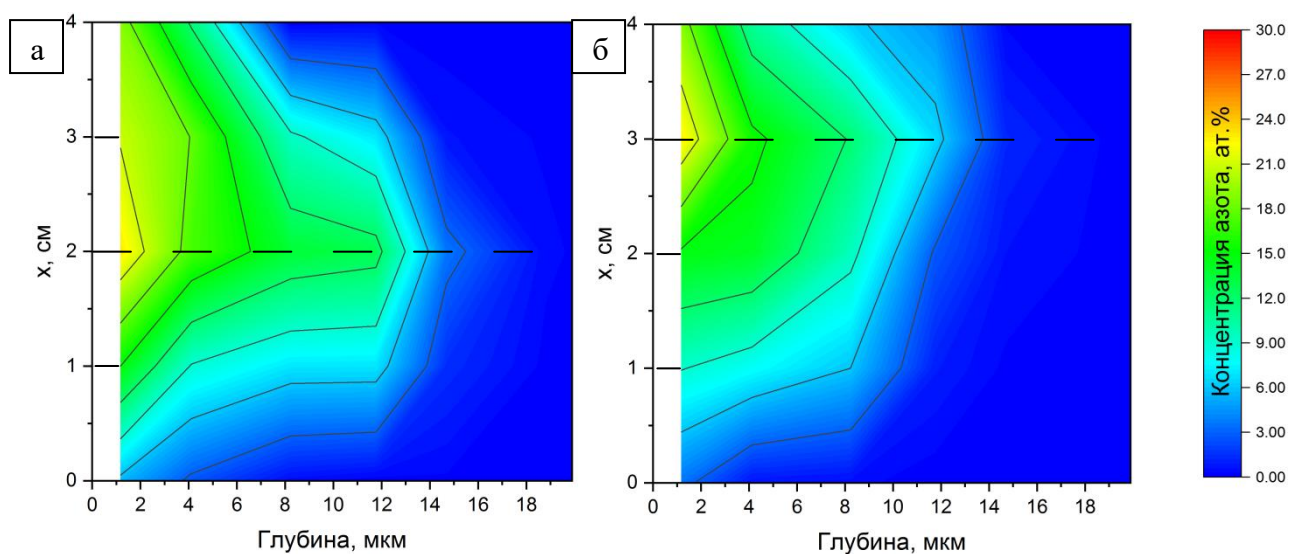
а) – точка фокуса пучка ионов находится в начале образцов;

б) – точка фокуса пучка ионов находится в середине образцов.

Рисунок 3.7 – Схема по исследованию модификации внутренней поверхности отверстий

Эксперименты проводились при одинаковых режимах и условиях, а именно: остаточное давление в камере 10^{-3} Па, амплитуда потенциала смещения -1.4 кВ, длительность импульса 10 мкс, коэффициент заполнения 40%, частота смещения 40 кГц, ток газового разряда 50А. Время обработки в обоих случаях равно 60 минутам.

Зависимость концентрации азота от глубины имплантированного слоя для данной серии экспериментов представлены на рисунке 3.8.



а – эталонный, б – со смещением коллектора

Рисунок 3.8 - Зависимость концентрации азота от глубины имплантированного слоя

Исходя из полученных результатов видно, что в случае эталонного образца (а), точка фокуса пучка находится на 2 см от начала образца. В данной точке находятся максимальные значения концентрации азота (23%) и глубины модифицированного слоя (12 мкм).

В тоже время, для образца со смещенным коллектором (б), точка фокуса находится на 3 см от начала образца. Максимальная концентрация азота достигает 22%, а максимальная глубина 9 мкм.

Полученные результаты предполагают возможность обработку более глубоких отверстий, если будет разработана система перемещения коллектора вдоль своей оси, также в дальнейшем процесс ионной имплантации на всю глубину отверстия может быть автоматизирован.

Вывод по главе «Ионная имплантация высокоинтенсивными пучками ионов азота низкой энергии»

Продемонстрирована возможность обработки внутренних поверхностей отверстий высокоинтенсивными низкоэнергетическими пучками ионов азота. Исследования проводились при следующих постоянных параметрах: амплитуда потенциала смещения минус 1.4 кВ, длительность импульса 10 мкс, коэффициент заполнения 40% и частота импульсов смещения 40 кГц.

Представлены результаты исследований распределения примеси азота и глубины ионно-модифицированного слоя на внутренних поверхностях отверстий. Описывается влияние ионного распыления при обработке внутренних поверхностей отверстий.

Метод высокоинтенсивной низкоэнергетической имплантации ионов азота доказал эффективность при модификации внутренних поверхностей отверстий. Исследования показали, что использование данного метода позволяет получить концентрацию азота, достигающую 22 ат.% и глубину имплантации вплоть до 12 мкм, при времени обработки 60 минут.

Повышение тока газового разряда с 30 до 50 А приводит как к увеличению глубины имплантированного слоя и повышению концентрации азота в поверхностном слое образца, так и к повышению ионного распыления.

Предложен способ увеличения длины обрабатываемой поверхности за счет перемещения детали относительно фокуса пучка ионов азота.

4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Введение

В данном разделе проведена оценка коммерческого и инновационного потенциала научно-исследовательской работы, направленной на модификацию внутренних поверхностей отверстий детали, путем применения высокоинтенсивной имплантации ионов азота низкой энергии, на примере использования стали 12Х18Н10Т. Ионная имплантация является одним из эффективных методов модификации поверхностных свойств материалов. Однако, данный метод ранее не использовался для обработки внутренних поверхностей отверстий. В связи с этим, были определены ресурсная, финансовая и экономическая эффективности.

Этапы решения задачи:

- провести анализ конкурентных технических решений;
- провести SWOT – анализ;
- предоставить организацию и планирование работ;
- построить график Ганта;
- провести расчёт материальных затрат, заработных плат, отчисления во внебюджетные фонды, затраты на электроэнергию и амортизационных расходов;
- провести анализ сравнительной эффективности работы.

4.1. Технико-экономическое обоснование научно-исследовательской работы

Научно-исследовательская работа посвящена применению высокоинтенсивной имплантации ионов азота низкой энергии для обработки внутренних поверхностей отверстий, на примере использования стали 12Х18Н10Т. Метод ионной имплантации обладает уникальными свойствами и обеспечивает возможность управляемого изменения элементного состава,

микроструктуры и свойств различных материалов, включая полупроводники, металлические и диэлектрические материалы, что даёт этому методу широкое применение.

4.2. Потенциальные потребители результатов исследования

Потенциальными потребителями результатов исследований являются организации в сфере авиастроения, машиностроения и ядерной энергетики. В каждой сфере необходимо модифицировать материалы, добиваясь новых свойств и качеств. Это означает, что потребители – крупные коммерческие и некоммерческие организации отраслевой принадлежности.

Для определения группы потребителей, которых может заинтересовать результаты данных научных исследований, необходимо провести сегментирование рынка.

Выбранные основные характеристики потребителей сегмента:

Месторасположение – регионы с развитыми отраслями тяжелой промышленности (авиастроение, машиностроение и ядерная энергетика).

Отношение к услуге – готовность внедрять новые технологии в технологический процесс

Закупочные принципы – компании, проводящие централизованный закуп товаров и услуг.

Так как исследований по модификации внутренних поверхностей ранее никем не проводилось, результаты будут интересны большинству организаций, вне зависимости от их месторасположения. Также данная технология заинтересует организации, нуждающиеся в модификации поверхностных свойств деталей со сложными формами.

Карта сегментирования рынка по модификации поверхностей представлена на рисунке 4.1.

		Вид услуги		
		Модификация поверхностного слоя	Нанесение защитных покрытий	Модификация поверхности сложных деталей
Вид промыш- ленности	Машиностроение			
	Авиастроение			
	Ядерная энергетика			
	Космическая промышленность			
	Advenira Enterprises		ЗАО «МАНЭЛ»	Группа компаний «Плакарт»

Рисунок 4.1 – Карта сегментирования рынка услуг по модификации поверхностей

В качестве конкурентных компаний были рассмотрены: Advenira Enterprises, ЗАО «МАНЭЛ», Группа компаний «Плакарт».

Компания Advenira Enterprises предоставляет услуги по нанесению нанопокрывтий на различные поверхности. Среди клиентов – машиностроительные, трубные и авиакосмические компании страны.

ЗАО «МАНЭЛ» - наноструктурные неметаллические неорганические покрытия. Машиностроение и строительство.

Группа компаний «Плакарт» - многофункциональные наноструктурированные защитные покрытия. Машиностроение, авиастроение, ядерная энергетика.

Исходя из карты сегментирования рынка услуг по модификации поверхностей, результаты научных исследований могут быть предложены в сегменте рынка модификации поверхностей сложных деталей (в том числе и с отверстиями) ядерной энергетике. Также можно выбрать сегмент модификации поверхностного слоя деталей авиастроения и/или космической промышленности, учитывая не высокую конкуренцию.

4.3. Анализ конкурентных технических решений

В отличие от других методов (лазерная обработка, обработка сильноточными электронными пучками и др.) модификация материала в ионной имплантации происходит за счёт изменения фазового и элементного состава в поверхностном слое.

Ионная имплантация как метод модификации материалов широко применяется в различных сферах промышленности. Имплантация различными материалами позволяет добиться улучшения поверхностных свойств материала. Например, имплантация ионов титана в циркониевый сплав Zr-1Nb за счет захвата водорода ионно-модифицированным слоем снижает гидрогенизацию, следовательно, увеличивает продолжительность безопасной работы тепловыделяющих элементов, в которых используют данный сплав. При имплантации ионов хрома в тот же циркониевый сплав Zr-1Nb, повышается устойчивость материала к окислению.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки. Для этого была составлена оценочная карта, таблица 4.1.

Б_Ф – высокоинтенсивная модификация внутренней поверхности отверстий пучками ионов азота низкой энергии. Б_{К1} – нанесение защитных покрытий.

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (исследований)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _Ф	Б _{К1}	К _{КФ}	К _{К1}
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1. Повышение производительности труда пользователя	0.1	4	4	0.4	0.4
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0.05	4	3	0.2	0.15
3. Помехоустойчивость	0.05	4	2	0.2	0.1
4. Энергоэкономичность	0.05	4	4	0.2	0.2
5. Надежность	0.1	4	3	0.4	0.3
6. Уровень шума	0.05	3	3	0.15	0.15
7. Безопасность	0.01	5	5	0.05	0.05
8. Потребность в ресурсах памяти	0.1	4	4	0.4	0.4
9. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0.1	5	3	0.5	0.3
10. Простота эксплуатации	0.05	4	4	0.2	0.2
11. Качество интеллектуального интерфейса	0.05	4	4	0.2	0.2
12. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0.01	5	5	0.05	0.05
Экономические критерии оценки эффективности					
1. Конкурентоспособность продукта	0.05	4	3	0.2	0.15
2. Уровень проникновения на рынок	0.02	5	5	0.1	0.1
3. Цена	0.03	4	4	0.12	0.12
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0.03	4	4	0.12	0.12
5. Послепродажное обслуживание	0.01	4	4	0.04	0.04
6. Финансирование научной разработки	0.08	4	5	0.32	0.4
7. Срок выхода на рынок	0.05	4	4	0.2	0.2
8. Наличие сертификации разработки	0.01	4	4	0.04	0.04
Итого	1	83	77	4.09	3.67

Исходя из таблицы 4.1, конкурентоспособность разработки научного исследования высокоинтенсивной модификации внутренней поверхности отверстий пучками ионов азота низкой энергии (Б_Ф) составила 4.09, против 3.67 метода нанесения защитных покрытий (Б_{К1}). Полученные данные свидетельствуют о превосходстве научно-технической разработки (Б_Ф) по

критериям: удобство в эксплуатации, помехоустойчивость, надёжность, функциональная мощность и конкурентоспособность продукта. Применение высокоинтенсивной модификации внутренней поверхности отверстий пучками ионов азота низкой энергии (БФ) позволяет добиться более высоких механических показателей обрабатываемого материала, в отличие от конкурирующего метода нанесения защитных покрытий (БК1). Данный метод (БФ) имеет более широкую область применения в промышленности.

4.4. 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.

По результатам SWOT анализа можно предоставить две таблицы, интерактивную матрицу работы, таблица 4.2, и результирующую таблицу с выявлением возможностей и угроз НИР, таблица 4.3.

Таблица 4.2 – Интерактивная матрица проекта

		Сильные стороны проекта			
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4
	B1	+	+	+	0
	B2	+	+	+	-
	B3	-	-	-	0

Таблица 4.3 – SWOT анализ

	<p>Сильные стороны: С1 – Широкий спектр предоставляемых возможностей (реализация нескольких типов релейной защиты, автоматики и функций); С2 – Длительный срок эксплуатации; С3 – Высокая эффективность работы защит (увеличенное быстродействие и чувствительность); С4 – Высокая точность обработки данных; С5 – Малые габариты оборудования; С6 – Малые объемы технического обслуживания оборудования; С7 – Удобство и простота настройки и эксплуатации; С8 – Возможность подключения устройства в общую информационную сеть</p>	<p>Слабые стороны: Сл1 – Высокая стоимость микропроцессорных устройств РЗА; Сл2 – Низкая ремонтпригодность; Сл3 – Необходимость квалифицированных специалистов для обслуживания оборудования; Сл4 – Усложнение схем и алгоритмов работы защит; Сл5 – Постепенное устаревание программного обеспечения и необходимость своевременного обновления.</p>
<p>Возможности: В1 – Государственная поддержка проектов по модернизации объектов промышленности; В2 – Использование оборудования отечественного производителя; В3 – Создание унифицированных проектов переоснащения оборудования РЗ типовых схем; В4 – Снижение стоимости микропроцессорных устройств релейной защиты (МУРЗ) за счет удешевления технологии производства; В5 – Актуализация внедрения микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики</p>	<p>Сильные стороны и возможности: 1) Привлечение государственных и частных средств на модернизацию объектов энергетики; 2) Использование высокотехнологичных, эффективных и быстродействующих устройств РЗ с большим сроком эксплуатации; 3) Применение технологий цифровой подстанции для создания системы по типу SCADA.</p>	<p>Слабые стороны и возможности: 1) Высокая стоимость проектов затрудняет повсеместное внедрение микропроцессорных устройств, ситуацию может улучшить государственное субсидирование проектов по перевооружению оборудования. 2) Применение оборудования отечественных производителей, а также государственное субсидирование позволит снизить стоимость на микропроцессорные устройства релейной защиты (МУРЗ), 3) Унификация и стандартизация проектов позволит упростить процесс</p>

Продолжение таблицы 4.3

		проектирования, повысится совместимость и взаимозаменяемость оборудования
<p>Угрозы: У1 – Рост стоимости импортных комплектующих; У2 – Появление новых конкурентных технических решений; У3 – Низкий спрос на рынке, обусловленный экономической ситуацией; У4 – Инертность рынка на переоснащение оборудования работающем на базе новых технологий.</p>	<p>Сильные стороны и угрозы: 1) Повышение стоимости импортного оборудования способствует повышению спроса на отечественное оборудование; 2) Появление конкурентных технических решений в конечном итоге будет способствовать снижению стоимости и повышению качественных показателей; 3) Снижение интенсивности спроса помимо убытка, будет способствовать развитию экономических стратегий по разработке технических решений в будущем.</p>	<p>Слабые стороны и угрозы: 1) Рост стоимости импортных компонентов может значительно повлиять на стоимость микропроцессорных устройств релейной защиты (МУРЗ), что может негативно сказаться на спросе в будущем; 2) Вследствие задержки между разработками и поступлением на рынок оборудования на базе новых технологий велика вероятность коммерческой неудачи вследствие малого спроса.</p>

Результаты SWOT-анализа учитываются при разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта.

Приведённый анализ показал, что технология, находясь на этапе разработки, имеет хорошие шансы на коммерциализацию, с учетом проявляемого интереса партнеров и удачных исследований. При этом если переход разработки в стадию коммерциализации затянется, то возможна потеря спроса на готовую технологию.

4.5. Организация и планирование работ

В данном разделе отражено распределение времени и трудового вклада участников исследовательской работы.

Определяющим фактором выражения основной части стоимости научно-технической разработки являются заработные платы лиц, задействованных в реализации проекта. В связи с этим, наиболее важным

моментом является максимально точное определение трудозатрат каждого из участников проекта [30].

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществлялось в следующем порядке:

- разработка задания;
- теоретические исследования;
- составление порядка эксперимента, выбор технических режимов;
- построение 3Д моделей и создание схемы эксперимента;
- изготовление исследуемых образцов;
- экспериментальные исследования;
- оценка результатов экспериментов;
- оформление отчёта по ВКР;
- подготовка к защите ВКР.

Примерный порядок составления этапов и работ, а также трудовой вклад участников исследовательской работы представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Перечень этапов работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель, инженер (дипломник)
	3	Проведение патентных исследований	Руководитель, инженер
	4	Выбор направления исследований	Руководитель, инженер
	5	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, инженер
Теоретические и экспериментальные исследования	6	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Руководитель, инженер
	7	Составление порядка эксперимента, выбор технических режимов	Руководитель, инженер, сотрудник-техник
	8	Изготовление исследуемых образцов	Инженер
	9	Построение 3Д моделей	Инженер
	10	Проведение экспериментов	Руководитель, инженер, сотрудник-техник

Продолжение таблицы 4.4

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Теоретические и экспериментальные исследования	11	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	Руководитель, инженер
Обобщение и оценка результатов	12	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, инженер
	13	Определение целесообразности проведения ОКР	Руководитель, инженер

Данная таблица отображает вклад каждого участника исследовательской работы. Наибольшая часть работы приходится на инженера (дипломника).

4.6. Продолжительность этапов работ

Для определения трудоёмкости реализации научного исследования выпускной квалификационной работы используется экспертный способ, основным показателем которого является человеко-день [31]. Для расчёта предлагаемого значения трудоёмкости используют следующую формулу

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

где $t_{ож}$ – ожидаемая трудоёмкость выполнения работы, чел.дн.; t_{min} – минимально возможная трудоёмкость выполнения работы, чел.дн.; t_{max} – максимально возможная трудоёмкость выполнения работы, чел.-дн.

Оценка трудоёмкости выполнения научного исследования для научного руководителя:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot 43 + 2 \cdot 91}{5} = 62.2 \text{ чел.} - \text{дн.}$$

Трудоёмкость выполнения научного исследования для сотрудника – техника:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot 6 + 2 \cdot 18}{5} = 10.8 \text{ чел.} - \text{дн.}$$

Трудоёмкость выполнения научного исследования для инженера:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot 61 + 2 \cdot 129}{5} = 88.2 \text{ чел.} - \text{дн.}$$

Далее определим продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями, по следующей формуле:

$$T_{pi} = \frac{t_{ож_i}}{Ч_i} \quad (4.2)$$

где $T_{ди}$ – продолжительность одного этапа работы, раб.дн.; $t_{ож_i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.; $Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Произведем длительно работ в рабочих днях.

Расчёт продолжительности работы выполнения научного исследования для научного руководителя:

$$T_{рд} = \frac{t_{ож}}{K_{вн}} \cdot K_{д} = \frac{62.2 \text{ чел.} - \text{дн.}}{1} \cdot 1 = 62.2 \text{ раб.дни}$$

Продолжительность работы выполнения научного исследования для сотрудника-техника:

$$T_{рд} = \frac{10.8 \text{ чел.} - \text{дн.}}{1} \cdot 1 = 10.8 \text{ раб.дни}$$

Продолжительность работы выполнения научного исследования для инженера:

$$T_{рд} = \frac{88.2 \text{ чел.} - \text{дн.}}{1} \cdot 1 = 88.2 \text{ раб.дни}$$

Ленточный график проведения научных работ изображается в форме диаграммы Ганта. Для построения диаграммы необходимо перевести рабочие дни в календарные дни, для чего воспользуемся следующим соотношением:

$$T_{кд} = T_{рд} \cdot T_{к}, \quad (4.3)$$

где $T_{кд}$ – продолжительность выполнения этапа в календарных днях; $T_{к}$ – коэффициент календарности, определяющийся выражением 4.4.

$$T_K = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{ВД}} - T_{\text{ПД}}}, \quad (4.4)$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году; $T_{\text{ВД}}$ – количество выходных дней в году; $T_{\text{ПД}}$ – количество праздничных дней.

Рассчитаем коэффициент календарности по формуле 4.4:

$$T_K = \frac{365}{365 - 66} = 1.22$$

Построим таблицу по результатам расчётов, в которой укажем трудоёмкости работ, название работы, а также укажем длительность работ в рабочих и календарных днях, таблица 4.5.

Таблица 4.5 - Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работ									Длит. работ в раб. дни Т _{рд}			Длит. работ в кален. дни Т _{кд}		
	t _{min} , чел.-дн			t _{max} , чел.-дн			t _{ож} , чел.-дн			НР	СТ	ИН	НР	СТ	ИН
	НР	СТ	ИН	НР	СТ	ИН	НР	СТ	ИН						
Составление и утверждение технического задания	2	-	-	4	-	-	2.8	-	-	2.8	-	-	3.4	-	-
Подбор и изучение материалов по теме	10	-	10	21	-	30	14.4	-	18	14.4	-	18	17.6	-	21.96
Проведение патентных исследований	5	-	7	8	-	15	6.2	-	10.2	6.2	-	10.2	7.6	-	12.4
Выбор направления исследований	3	-	5	4	-	7	3.4	-	5.8	3.4	-	5.8	4.2	-	7.1
Календарное планирование работ по теме	2	-	3	3	-	4	2.4	-	3.4	2.4	-	3.4	2.9	-	4.2
Проведение теоретических расчетов и обоснований	4	-	7	6	-	10	4.8	-	8.2	4.8	-	8.2	5.9	-	10
Составление порядка эксперимента, выбор технических режимов	1	1	2	3	3	4	1.8	1.8	2.8	1.8	1.8	2.8	2.2	2.2	3.4
Изготовление исследуемых образцов	-	-	2	-	-	3	-	-	2.4	-	-	2.4	-	-	2.9
Построение 3Д моделей	-	-	7	-	-	12	-	-	9	-	-	9	-	-	11
Проведение экспериментов	5	5	5	15	15	15	9	9	9	9	9	9	11	11	11
Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	5	-	7	10	-	12	7	-	9	7	-	9	8.5	-	11
Оценка эффективности полученных результатов	3	-	3	10	-	10	5.8	-	5.8	5.8	-	5.8	7.1	-	7.1
Определение целесообразности проведения ОКР	3	-	3	7	-	7	4.6	-	4.6	4.6	-	4.6	5.6	-	5.6
Итого	43	6	61	91	18	129	62.2	10.8	88.2	62.2	10.8	88.2	75.9	13.2	107.6

На основе таблицы 4.5, построим календарный план-график. График построим для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта, с разбивкой по месяцам и декадам за период времени дипломирования. Отметим области в зависимости от исполнителей, ответственных за конкретную работу, таблица 4.6.

Таблица 4.6 – Календарный план-график (график Ганта) проведения НИОКР

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т _{кi} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ														
				январь	февраль			март			апрель			май			июнь	
				3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы	4.88															
2	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель	25.6															
		Инженер (дипломник)	36.6															
3	Проведение патентных исследований	Руководитель	9.8															
		Инженер (дипломник)	18.3															
4	Выбор направления исследований	Руководитель	4.9															
		Инженер (дипломник)	8.5															
5	Календарное планирование работ по теме	Руководитель	3.7															
		Инженер (дипломник)	4.9															
6	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Руководитель	7.3															
		Инженер (дипломник)	12.2															
7	Составление порядка эксперимента, выбор технических режимов	Руководитель	3.7															
		Инженер (дипломник)	4.9															
		Сотрудник-техник	3.7															
8	Изготовление исследуемых образцов	Инженер (дипломник)	3.7															
9	Построение 3Д моделей	Инженер (дипломник)	14.6															

Продолжение таблицы 4.6

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т _{кi} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ																
				январь	февраль			март			апрель			май			июнь			
				3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2		
10	Проведение экспериментов	Руководитель	18.3																	
		Инженер (дипломник)	18.3																	
		Сотрудник-техник	18.3																	
11	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	Руководитель	12.2																	
		Инженер (дипломник)	14.6																	
12	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель	12.2																	
		Инженер (дипломник)	12.2																	
13	Определение целесообразности проведения ОКР	Руководитель	8.5																	
		Инженер (дипломник)	8.5																	

где красным цветом обозначен руководитель темы, зеленым инженер (дипломник), желтым сотрудник-техник

Были определены длительности и обозначены сроки выполнения всех запланированных видов работ. Был построен график Ганта, наглядно иллюстрирующий этапы выполнения проекта участниками.

4.7. Бюджет научного исследования

4.7.1. Расчёт материальных затрат

Расчёт материальных затрат включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта, таблица 4.7.

Таблица 4.7 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Кол-во	Цена за ед., руб.	Сумма, руб.
Сталь 12X18Н10Т	м	1	1284	1284
Азотный баллон	шт	1	5650	5650
Диск для нарезки образцов из карбида кремния	шт	1	1650	1650
Халат	шт	1	500	500
Бумага наждачная, зернистость – 800	шт	4	52	208
Бумага наждачная, зернистость - 1500	шт	4	30	120
Бумага наждачная, зернистость – 2000	шт	4	115	460
Бумага наждачная, зернистость – 4000	шт	4	170	680
Итого				10552

По полученным данным, наибольшие расходы приходятся на сырьё и рабочий газ.

4.7.2. Расчет затрат на специальное оборудование для экспериментальных работ

Используемые при выполнении ВКР: научно-исследовательская вакуумная установка, персональный компьютер, осциллограф Rigol MS01104, отрезной станок Brilliant 201, шлифовальная машина Saphir 320, растровый электронный микроскоп Hitachi S-3400 N и профилометр STIL 3D Micromesure – в материальных затратах не учитывались, так как имелись в оснащении лаборатории. В связи, с чем рассчитаем их амортизационные отчисления.

Проведем расчет амортизации использованного оборудования на примере осциллографа Rigol MS01104. Первоначальная стоимость 160000 рублей; срок полезного использования для осциллографов, согласно общероссийскому классификатору основных фондов, составляет 3-5 лет, код

143312467; Время работы на всём оборудовании не превышало одного месяца за все время исследования. Тогда:

- норма амортизации:

$$H_a = \frac{1}{n} \cdot 100\% = \frac{1}{5} \cdot 100\% = 20\%, \quad (4.5)$$

где H_a – норма амортизации в процентах; n – срок полезного использования в годах.

- годовые амортизационные отчисления:

$$A_r = 160000 \cdot 0.2 = 32000 \text{ рублей}$$

- ежемесячные амортизационные отчисления:

$$A_m = \frac{32000}{12} = 2667 \text{ рублей}$$

- итоговая сумма амортизации основных средств:

$$A = 2667 \cdot 1 = 2667 \text{ рублей}$$

Также произведем расчет для остального оборудования и занесем полученные данные в таблицу 4.8.

Таблица 4.8 – Расчеты амортизационных отчислений

Наименование	Первонач. Цена, руб.	Норма аморти., %	Годовые аморти. отчисл., руб.	Ежемесяч. аморти. отчисл., руб.	Затраты, руб.
Осциллограф Rigol MS01104	160000	20	32000	2667	2667
Вакуумная установка	7000000	14.3	1001000	83417	83417
Отрезной станок Brilliant 201	260000	10	26000	2167	2167
Шлифовальная машина Saphir 320	300000	10	30000	2500	2500
РЭМ Hitachi S-3400 N	1500000	14.3	214500	17875	17875
Профилометр	1350000	14.3	193050	16088	16088

4.7.3. Основная заработная плата исполнителей исследования

Для вычисления основной заработной платы необходимо учесть научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских

и опытных производств, участвующих в выполнении выпускной квалификационной работе.

Основная заработная плата работников вычисляется по формуле:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} \quad (4.6)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата; $Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12-20% от $Z_{осн}$).

Основная заработная плата одного работника:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p \quad (4.7)$$

где T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.; $Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывалась по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_M \cdot M}{F_d} \quad (4.8)$$

где Z_M – месячный должностной оклад работника, руб; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года; F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

В таблице 4.9 представлен годовой баланс рабочего времени для 6-дневной рабочей недели.

Таблица 4.9 – Баланс рабочего времени (для 6-дневной недели)

Показатели рабочего времени	Дни
Календарные дни	365
Нерабочие дни (праздники/выходные)	66
Потери рабочего времени (отпуск/невыходы по болезни)	47
Действительный годовой фонд рабочего времени	252

В таблице 4.10 представлены расчёты заработной платы

Таблица 4.10 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Оклад, руб/мес	Среднедневная ставка, руб/раб. день	Затраты времени, раб. дни	Фонд, з/платы, руб
Научный руководитель	26116	1077.8	62.2	67039.16
Сотрудник-техник	13058	538.9	10.8	5820.12
Инженер (дипломник)	-	-	88.2	-
Итого				72859.28

По данным таблицы 4.10 получены данные по затратам на заработную плату сотрудников за весь период ВКР.

4.7.4. Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} \quad (4.9)$$

где, $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0.12-0.15).

Дополнительная заработная плата руководителя:

$$Z_{\text{доп}} = 0.13 \cdot 67039.12 = 8715.09 \text{ руб.}$$

Дополнительная заработная плата сотрудника-техника:

$$Z_{\text{доп}} = 0.13 \cdot 5820.12 = 756.62 \text{ руб.}$$

Суммарная дополнительная заработная плата равна 9471.71 рубль.

4.7.5. Отчисления во внебюджетные фонды

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Ставка отчислений во внебюджетные фонды для учреждений, осуществляющих научную и образовательную деятельность, на 2021 год составляет 30% (ПФ – 22%, ФФОМС – 5.1%, ФСС – 2.9%)

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб.} = k_{внеб.} \cdot Z_{осн.} \quad (4.10)$$

где: $k_{внеб.}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

Расчет отчислений во внебюджетные фонды:

$$Z_{внеб.} = 69915 \cdot 0.3 \approx 20974.5 \text{ руб.}$$

4.7.6. Расчёт затрат на электроэнергию

Потребляемая мощность анализатора составляет 7 кВт/час. Длительность еженедельной работы на комплексной технологической установке составляет 2 часа. Стоимость электроэнергии в Томске составляет 5.748 рубля за 1 кВт/час. Стоимость электропотребления за 5 месяцев рассчитывается по формуле:

$$C_{эл.об.} = P_{об.} \cdot Ц_{э} \cdot t_{об.}, \quad (4.11)$$

где $P_{об.}$ – мощность, потребляемая оборудованием, кВт; $Ц_{э}$ – тариф на 1 кВт·час; $t_{об.}$ – время работы оборудования, час.

Затраты на электроэнергию для технологических целей приведены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Затраты на электроэнергию

Наименование оборудования	Время работы оборудования	Потребляемая мощность $P_{об.}$, кВт	Затраты $C_{эл.об.}$, руб.
Персональный компьютер	646	0.3	1113.96
Комплексная технологическая установка	40	7	1609.44
Итого			2723.4

4.7.7. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Расчет бюджета затрат НИИ приведен в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Удельный вес, %
Материальные затраты	10552.00	3.81
Затраты на специальное оборудование (амортизационные отчисления)	124714.00	45.06
Затраты на основную заработную плату	72859.28	26.34
Затраты на дополнительную заработную плату	9471.71	3.42
Страховые взносы	20974.50	7.58
Накладные расходы	38171.44	13.79
Бюджет затрат НИИ	276742.93	100

4.8. Определение сравнительной эффективности исследования

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

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется по следующей формуле:

$$I_{\text{ФИНФ}}^{\text{ИСП}i} = \frac{\Phi_{Pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (4.12)$$

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

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить по формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (4.13)$$

В таблице 4.13 представлена сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта. Данный проект сравнивается с методикой качественного анализа материалов, заложенной в программе как базовая.

Таблица 4.13 – Сравнительная оценка характеристик

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Данный проект	Базовая методика качественного анализа материалов
Способствует росту производительности труда	0.25	5	5
Соответствует требованиям потребителей	0.15	4	4
Энергосбережение	0.2	4	3
Надежность	0.2	4	4
Материалоемкость	0.2	5	4
Интегральный показатель ресурсоэффективности		4.45	4.25

Характеристики имеют схожие критерии, так как методики реализованы для одного прибора. Каждая из представленных методик реализована для определённой задачи.

Пример расчёта интегрального показателя ресурсоэффективности:

$$I_p = 0.25 \cdot 5 + 0.15 \cdot 4 + 0.2 \cdot 4 + 0.2 \cdot 4 + 0.2 \cdot 5 = 4.45$$

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

$$I_{исп} = \frac{I_{pi}}{I_{финр}}, \quad (4.14)$$

Сравнительная эффективность проекта определяется по следующей формуле:

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{д.п.}}{I_{исп}}, \quad (4.15)$$

В таблице 4.14 представлена сравнительная эффективность данного проекта с базовой методикой качественного анализа материалов.

Таблица 4.14 – Сравнительная эффективность

Показатели	Данный проект	Базовая методика качественного анализа материалов
Интегральный финансовый показатель	1	1
Интегральный показатель ресурсоэффективности	4.45	4.25
Интегральный показатель эффективности	4.45	4.25
Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1.05	0.95

Как видно из таблицы 4.14, разработанная методика эффективнее стандартной.

Традиционная оценка экономической эффективности полученных результатов невозможны, т.к. они носят чисто научный характер.

Выводы по главе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

1. В ходе выполнения раздела «Финансовый менеджмент» был выполнен анализ конкурентоспособности. Данный анализ подтвердил конкурентоспособность применение метода высокоинтенсивной имплантации ионов азота низкой энергии для обработки внутренних поверхностей отверстий на примере стали 12X18H10T, в связи с более высокими показателями механических характеристик.

2. Проведён SWOT-анализ проекта, в ходе которого были выявлены потенциальные внутренние и внешние сильные и слабые стороны, возможности и угрозы. Анализ показал, что потенциальных сильных сторон у проекта больше, чем слабых, что доказывает перспективность разработок проекта.

3. Установлено, что в календарных днях длительность работ для научного руководителя составило 75.9 дней, для сотрудника-инженера 13.2, а для инженера 107.6 дней.

4. На основе временных показателей по каждой из произведенных работ был построен календарный план-график Ганта, по которому можно увидеть, что самая продолжительная по времени работа – подбор и изучение материалов.

5. Определены показатели ресурсоэффективности, интегральный финансовый показатель, интегральный показатель эффективности и сравнительная эффективность вариантов исполнения, значения которых свидетельствуют о достаточно высокой эффективности реализации технического проекта.

Бюджет затрат научно-технического исследования составил 276742.93 рубля. Наибольшая статья расходов приходится на амортизационные отчисления, в связи с большим количеством дорогостоящего специального оборудования (45.06%). На втором месте затраты на основную заработную плату (29.76%).

5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Введение

Данный раздел посвящен вопросам обеспечения нормативных условий труда (санитарно-гигиенические условия, защита от опасных производственных факторов, обеспечение пожарной безопасности) в соответствии с действующими нормативными документами.

В настоящей работе проведены исследования по высокоинтенсивной имплантации ионов азота низкой энергии внутренней поверхности отверстий детали. Эксперименты проводятся на комплексной технологической установке, состоящей из вакуумной системы, источников тока разряда и т.д.

Данный раздел отвечает на вопросы по безопасности исследователей, рассматривая опасные и вредные факторы, а также несет правовой смысл.

5.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

К работе на комплексной установке, включающей в себя высокочастотные генераторы потенциалов смещения, допускаются лица старше 18 лет, не имеющие медицинских противопоказаний, прошедшие обучение безопасности труда и инструктаж на рабочем месте [31]. Работники прошедшие специальное обучение, проверку знаний, норм, правил навыков безопасной выполнения работы с установками, имеющие не ниже III группы по электробезопасности, допускаются к самостоятельной работе.

Ежегодно проводится повторная проверка знаний норм и правил электробезопасности, инструктаж на рабочем месте – ежеквартально.

Все виды инструктажа фиксируются в журнале регистрации инструктажа установленного образца, с указанием даты проведения инструктажа, наименования и номеров инструкции на виды работ, по которым проводится инструктаж, с обязательными подписями проводившего и получившего инструктаж.

По данной теме рассматриваются специальные законодательные и нормативные документы:

- инструкция № 2-14 по охране труда при работе с электрооборудованием напряжением до 1000 В;
- инструкция № 2-07 по охране труда при работе с баллонами, работающими под давлением;
- инструкция № 2-08 по охране труда при работе с ПЭВМ и ВДТ.

Согласно [32], продолжительность работ не должна превышать 40 часов в неделю, таким образом, при шестидневной рабочей неделе продолжительность рабочего дня должна составлять не более 7 часов.

Обязательное социальное страхование работников регламентируется [32, 33, 34]. Работодатели обязуются обеспечить своим подчиненным социальное страхование от возможных производственных несчастных случаев. Также представленный вид страхования может применяться в случае возникновения профессионального заболевания. Работники могут получать выплаты на основаниях, указанных в [33].

Пособия по временной нетрудоспособности, размеры пособий по временной нетрудоспособности и условия их выплаты устанавливаются [32, ст. 236].

5.2. Производственная безопасность

Вредные и опасные факторы, воздействующие на персонал представленные в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.003-2015)	Тип фактора			Нормативные документы
	Разра- ботка	Изготов- ление	Эксплу- тация	
1. Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	Требования к допустимым параметрам микроклимата регулируются СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [35].
2. Отсутствие или недостаток необходимого естественного и искусственного освещения	+	+	+	Требования к освещенности рабочей зоны устанавливаются СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* [36]
3. Превышение уровня шума		+	+	Требования к допустимым уровням шума приводятся в СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [35]
4. Превышение уровня вибрации		+	+	Требования к допустимым уровням вибрации приводятся в СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [35]
5. Опасность поражения электрическим током	+	+	+	Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. ГОСТ 12.1.019-2017 [37]

5.2.1. Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований

5.2.1.1. Отклонение показателей микроклимата

Микроклиматом производственных помещений называют метеорологические условия внутри помещений. Эти условия определяются факторами, действующими на организм человека: температура воздуха, влажность, скорость движения воздуха и тепловое излучение.

Перегрев организма наступает при высокой температуре воздуха и высокой относительной влажности, которые сопровождаются низкой подвижностью воздушной массы. При наступлении переохлаждения снижается температура тела, происходит сужение кровеносных сосудов, возникают сбои в работе сердечнососудистой системы, согласно разделу пять физические факторы, пункт предельно допустимые уровни физических факторов на рабочих местах [35].

Санитарными нормами, установленными для производственных помещений [35] утверждены допустимые интервалы температуры воздуха, относительной влажности и скорости движения воздушных масс. Нормативы установлены с учетом тяжести выполняемой работы и времени года. В таблице 5.2 отражены допустимые величины параметров микроклимата на рабочих местах в помещениях для категории работ Па, работы, связанные с постоянной ходьбой, выполняемее стоя или сидя, но не требующие перемещения тяжестей.

Таблица 5.2 – Допустимые величины параметром микроклимата на рабочих местах в помещениях, согласно разделу пятому Физические факторы, пункту Допустимые величины параметров микроклимата на рабочих местах в помещениях [35]

Период года	Температура воздуха, °С		Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	
	Диапазон ниже оптим. величин	Диапазон выше оптим. величин			Для диапазона температур воздуха ниже оптим. величин, не более	Для диапазона температур воздуха выше оптим. величин, не более
Холодные	17.0-18.9	21.1-23.0	40-60	15-75	0.1	0.3
Теплый	18.0-19.9	22.1-27.0	40-60	60°С – при 27 °С	0.1	0.4

К способам нормализации метеорологических условий производственной среды относятся вентиляция, отопление и кондиционирование.

5.2.1.2. Отсутствие или недостаток необходимого естественного и искусственного освещения

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

Неудовлетворительное и некачественное освещение утомляет зрение, может стать причиной его снижения, реже слепоты. Плохо освещенные участки рабочего места могут стать причиной травматизма.

В соответствии с СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*» [36] все зрительные работы делятся на 8 разрядов и зависимости от размера объекта различения и условий зрительной работы. Принимаем четвертый разряд зрительной работы (средней точности). Допустимые значения наименьшей освещенности рабочих поверхностей в производственных помещениях в соответствии с выше обозначенным документом, для четвертого разряда зрительной работы приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Нормирование значения освещенности на рабочих местах производственных помещений при искусственном освещении

Наименьший размер объекта, мм	Подразряд зрительной работы	Контраст объекта различия с фоном	Характер фона	Освещенность, лк	
				Комбинированное	Общее
0.5-1.0	а	Малый	Темный	750	300
	б	Малый	Средний	500	200
		Средний	Темный	500	200
	в	Малый	Светлый	400	200
		Средний	Светлый	400	200

Искусственное освещение обеспечивается с помощью люминесцентных ламп ЛВ (белого цвета) мощностью 20, 40, 80 Вт. Для рабочих мест с искусственным освещением регламентирована допустимая освещенность, согласно действующим санитарным нормам и правилам СП 52.13330.2016 [6]. Согласно СП 52.13330.2016 газоразрядные лампы приняты в качестве основного источника света. Необходимо учитывать, пульсацию

светового потока(слепящее действие), а также возникновение стробоскопического эффекта. Для уменьшения коэффициента пульсации люминесцентные лампы включают в разные фазы трехфазной электрической сети.

5.2.1.3. Превышение уровня шума

Главным источником шума в лаборатории является форвакуумный насос. Шум является биологическим раздражителем, способным влиять на все органы и системы организма, вызывая разнообразные физиологические изменения. К биологически агрессивному шуму относятся импульсный и тональный шум. Повышение уровня шума до 40–80 дБ создает значительную нагрузку на нервную систему, вызывая ухудшение самочувствия, а при длительном действии может быть причиной неврозов. Воздействие шума уровнем свыше 80 дБ может привести к потере слуха – профессиональной глухоте. При действии уровней свыше 140 дБ возможен разрыв барабанных перепонки, контузия, а при уровне более 160 дБ наступает летальный исход.

Уровни шума на рабочих местах пользователей персональных компьютеров не должны превышать значений, утвержденных [35].

Для определения допустимого уровня шума на рабочих местах используется ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности [38]. Нормирование шума производится по комплексу показателей с учетом их гигиенической значимости на основании СанПиН 1.2.3685-21 [35]. Принято два метода нормирования: по предельному спектру шума и по интегральному показателю (эквивалентному уровню шума, дБ). Выбор метода зависит от временных характеристик шума. В таблице 5.4 представлены допустимые уровни звукового давления на рабочем месте, согласно разделу пять физические факторы, пункта нормируемые параметры шума в октавных полосах частот, эквивалентных и максимальных уровней звука проникающего шума в помещениях жилых и общественных зданий и шума на селитебной территории [35].

Таблица 5.4 – Допустимые уровни звукового давления на рабочем месте

Назначение территорий	Территории, непосредственно прилегающие к зданиям образовательных организаций							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Уровень звукового давления, дБ	75	66	59	54	50	47	45	44

К средствам коллективной защиты можно отнести средства, снижающие шум в самом источнике, а именно применение рациональных конструкций и новых материалов, разработка нового типа насоса с меньшим звуковым воздействием, удаление источника шума за радиус воздействия на человека либо временное разграничение работы прибора и человека в одном помещении.

5.2.1.4. Превышение уровня вибрации

Форвакуумный насос является источником вибрации, причина которой заключается в возвратно-поступательном движении ротора.

Результатом действия вибрации могут быть головокружения, расстройство координации движений, нарушения зрительной функции, снижение болевой, тактильной и вибрационной чувствительности.

Клинические проявления воздействия вибрации, зависят от спектрального состава вибрации, продолжительности воздействия, индивидуальных особенностей человека, направления вибрационного воздействия, места приложения, явлений резонанса, условий воздействия вибрации (факторов производственной среды, усугубляющих вредное воздействие вибрации на организм человека).

Нормы по производственной вибрации согласно СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [35] приведены в таблице 5.5 предельно допустимые значения производственной локальной вибрации.

К средствам защиты от вибрации можно отнести вибродемпфирование (процесс уменьшения уровня вибрации путём превращения энергии

механических колебаний системы в другие виды энергии), виброгашение (уменьшение уровня вибрации защищаемого объекта путём введения в систему дополнительных сопротивлений упругого или инерционного типа) и виброизоляцию (осуществляется посредством упругой связи, препятствующей передаче вибраций от источника колебаний к элементам конструкции или человеку).

Таблица 5.5 – Предельно допустимые значения производственной локальной вибрации

Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц	Эквивалентные значения и уровни виброускорения для направлений действия Z,Y,X	
	м/с ² ·10 ⁻³	дБ
2	10	77
4	11	78
8	14	80
16	28	86
31.5	56	92
63	110	98
Корректированные и эквивалентные корректированные значения и их уровни, частотная коррекция Wm	10	80

5.2.1.5. Опасность поражения электрическим током

Опасность поражения током в данной работе создавали генераторы высокого напряжения. Проходя через живые ткани организма человека, электрический ток производит электролитическое, термическое, механическое, световое, биологическое, световое воздействие на организм. С целью обеспечения максимальной защиты от поражения электрическим током необходимо доскональное соблюдение правил технической эксплуатации электроустановок и проведение мероприятий по защите от электротравм [39].

Допустимые для человека токи оцениваются по трём критериям электробезопасности: осязаемый ток, который не вызывает нарушения деятельности организма, отпускающий и фибрилляционный токи.

В таблице 5.6 приведены предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов, протекающих через тело человека, которые не должны превышать согласно ГОСТ 12.1.038-82 с изм. от июня 2001 г. [40].

Таблица 5.6 - Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов, протекающих через тело человека

Продолжительность воздействия тока, с	Предельно допустимые значения, не более		Продолжительность воздействия тока, с	Предельно допустимые значения, не более	
	U, В	I, мА		U, В	I, мА
0.01-0.08	550	650	0.6	95	105
0.1	340	400	0.7	85	90
0.2	160	190	0.8	75	75
0.3	135	160	0.9	70	65
0.4	120	140	1.0	60	50
0.5	105	125	Свыше 1.0	20	6

Лаборатория относится к помещению без повышенной опасности поражения электрическим током. Недоступность токоведущих частей в помещении достигается путем их надежной изоляции, применения защитных ограждений, расположения токоведущих частей на недоступной высоте. К СКЗ относятся заземление и разделение электрической сети с помощью трансформаторов - в результате изолированные участки сети обладают большим сопротивлением изоляции и малой емкостью проводов относительно земли, за счет чего значительно улучшаются условия безопасности [41].

5.3. Экологическая безопасность

Охрана окружающей среды - комплексная проблема и наиболее активной формой ее решения является сокращение вредных выбросов промышленных предприятий с переходом к безотходным или малоотходным технологиям производства. Для перехода к безотходным производствам в лаборатории необходимо осуществлять сбор аргона в специальные емкости, в настоящее время он выпускается в воздух через специальный фильтр при продувке вакуумной системы.

Также необходимо улучшить систему улавливания/фильтрации масляных паров при работе пластинчато-роторных насосов. В данный момент стоят фильтры, улавливающие масло и масляные пары, но все же, используемые фильтры не улавливают все вредные вещества.

Следует иметь отдельные контейнеры для отходов бытового характера: для бумаги, стекла, металлических частей, пластика, резины и т. д.

5.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

5.4.1. Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований

Наиболее характерным в условиях лаборатории и типичным ЧС является пожар, возникающий в условиях неисправности работы оборудования. Под пожаром понимают неконтролируемое горение, причиняющее материальный ущерб, вред жизни и здоровью людей, интересам общества, государству.

Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, статическое электричество и т. д.

5.4.2. Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС

В качестве превентивных мер по предотвращению пожаров и взрывов на объекте используются меры: дважды в год инструктаж по противопожарной безопасности, внедрение инструкций, регламентов и норм ведения технологического процесса на подстанции; распределение выполнения работ при аварийных ситуациях [42].

В рассматриваемой рабочей зоне, для увеличения противопожарной устойчивости необходимо: периодический осмотр состояния лабораторного оборудования, содержание в исправном состоянии токоведущих проводников, обеспечение свободного доступа к оборудованию.

Предусмотрено звуковое оповещение, при срабатывании датчиков на задымление в помещениях.

Для локализации или ликвидации загорания на начальной стадии используются первичные средства пожаротушения. Первичные средства пожаротушения обычно применяют до прибытия пожарной команды.

В общественных зданиях и сооружениях на каждом этаже должно размещаться не менее двух переносных огнетушителей. Огнетушители следует располагать на видных местах вблизи от выходов из помещений. Размещение первичных средств пожаротушения в коридорах, переходах не должно препятствовать безопасной эвакуации людей, рисунок 5.1.



Рисунок 5.1 – План эвакуации при пожаре и других ЧС из помещений учебного корпуса №11

Здание должно соответствовать требованиям пожарной безопасности: наличие охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации, порошковых или углекислотных огнетушителей с поверенным клеймом, табличек с указанием направления к выходу.

Выводы по разделу «Социальная ответственность»

В разделе ВКР социальная ответственность был проведен анализ возможных опасных и вредных факторов на рабочем месте исследователя.

Были предложены превентивные меры и меры безопасности. Проведен анализ безопасности предприятия по отношению к экологии и безопасности в случае чрезвычайных ситуаций. В результате анализа было подтверждено, что все необходимые меры для обеспечения безопасности сотрудников в лаборатории приняты, например, все элементы, порождающие шум изолированы. Установлена оптимальная система освещения для обеспечения искусственного белого света. В случае ЧС в лаборатории присутствуют огнетушители.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе впервые была показана возможность применения методов высокоинтенсивной имплантации ионов азота низких энергий для обработки внутренних поверхностей отверстий. Для выполнения исследований был разработан коллектор альтернативной формы, имитирующий отверстие детали, облегчающий исследование и предотвращающий деформацию образцов. Исследования проводились при амплитуде потенциала смещения минус 1.4 кВ, длительности импульса 10 мкс, коэффициенте заполнения 40% и частоте импульсов смещения 40 кГц. Представлены результаты исследований распределения примеси азота и глубины ионно-модифицированного слоя на внутренних поверхностях отверстий при токе газового разряда 30 и 50 А. Описано влияние ионного распыления при обработке внутренних поверхностей отверстий.

Исследования показали, что использование метода высокоинтенсивной низкоэнергетической имплантации ионов азота при обработке внутренних поверхностей отверстий, позволяет получить концентрацию азота, достигающую 22 ат.% и глубину имплантации вплоть до 12 мкм, при времени обработки 60 минут и токе газового разряда 50 А. Повышение тока газового разряда с 30 до 50 А приводит как к увеличению глубины имплантированного слоя и повышению концентрации азота в поверхностном слое образца, так и к повышению ионного распыления.

Также предложен способ увеличения длины обрабатываемой поверхности за счет перемещения детали относительно фокуса пучка ионов азота.

Анализ подтвердил конкурентоспособность применение метода высокоинтенсивной имплантации ионов азота низкой энергии для обработки внутренних поверхностей отверстий, в связи с более высокими показателями механических характеристик. Проведенный SWOT-анализ проекта, выявил потенциальные внутренние и внешние сильные и слабые стороны, возможности

и угрозы. На основе временных показателей по каждой из произведенных работ был построен календарный план-график Ганта. Рассчитанные показатель ресурсоэффективности, интегральный финансовый показатель, интегральный показатель эффективности и сравнительная эффективность вариантов исполнения, свидетельствуют о высокой эффективности реализации технического проекта. Бюджет затрат научно-технического исследования составил 276742.93 рубля.

Также был проведен анализ возможных опасных и вредных факторов на рабочем месте исследователя. Были предложены превентивные меры и меры безопасности. Проведен анализ безопасности предприятия по отношению к экологии и безопасности в случае чрезвычайных ситуаций. В результате анализа было подтверждено, что все необходимые меры для обеспечения безопасности сотрудников в лаборатории приняты.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Hoshiyama Y., Mizobata R., Miyake H. Mechanical properties of austenitic stainless steel treated by active screen plasma nitriding //Surface and Coatings Technology. – 2016. – Т. 307. – С. 1041-1044.
- 2 Asri R. I. M. et al. Corrosion and surface modification on biocompatible metals: A review //Materials Science and Engineering: C. – 2017. – Т. 77. – С. 1261-1274.
- 3 Yang G. Y. et al. Deposition of TiN/TiAlN multilayers by plasma-activated EB-PVD: tailored microstructure by jumping beam technology //Rare Metals. – 2017. – Т. 36. – №. 8. – С. 651-658.
- 4 Chi Y. et al. Laser surface alloying on aluminum and its alloys: A review //Optics and Lasers in Engineering. – 2018. – Т. 100. – С. 23-37.
- 5 Ivanov Y. F. et al. Superhard nanocrystalline Ti–Cu–N coatings deposited by vacuum arc evaporation of a sintered cathode //Surface and Coatings Technology. – 2012. – Т. 207. – С. 430-434.
6. YuP. Sharkeev, N.V. Girsova, A.I. Ryabchikov, Nucl. Inst. Methods Phys. Res. B 106 (1-4) (1995) 532.
7. Ryabchikov A. I. et al. High intensity metal ion beam generation //Vacuum. – 2017. – Т. 143. – С. 447-453.
8. Ryabchikov A. I. et al. High-intensity low energy titanium ion implantation into zirconium alloy //Applied Surface Science. – 2018. – Т. 439. – С. 106-112.
9. Ryabchikov A. I. et al. Low energy, high intensity metal ion implantation method for deep dopant containing layer formation //Surface and Coatings Technology. – 2018. – Т. 355. – С. 123-128.
10. Ryabchikov A. I. et al. Plasma-immersion formation of high-intensity gaseous ion beams //Vacuum. – 2019. – Т. 165. – С. 127-133.
11. Wei R. Low energy, high current density ion implantation of materials at elevated temperatures for tribological applications //Surface and Coatings Technology. – 1996. – Т. 83. – №. 1-3. – С. 218-227.

12. Gavrilov N. V., Men'shakov A. I. Effect of the electron beam and ion flux parameters on the rate of plasma nitriding of an austenitic stainless steel //Technical physics. – 2012. – Т. 57. – №. 3. – С. 399-404.
13. Рябчиков А. и др. Модификация стали 40Х при высокоинтенсивной имплантации ионов азота //Известия высших учебных заведений. Физика. – 2018. – Т. 61. – №. 2. – С. 60-66.
14. Ryabchikov A. I. et al. High-intensity low energy titanium ion implantation into zirconium alloy //Applied Surface Science. – 2018. – Т. 439. – С. 106-112.
15. Ryabchikov A. I. Progress in low energy high intensity ion implantation method development //Surface and Coatings Technology. – 2020. – Т. 388. – С. 125561.
16. Komarov F. F., Yuvchenko V. N. Use of the temperature peak model for the description of track formation in semiconductor crystals irradiated by fast heavy ions //Technical Physics. – 2003. – Т. 48. – №. 6. – С. 717-721.
17. Koval T. V. et al. Formation of high intensity ion beams with ballistic focusing //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2017. – Т. 927. – №. 1. – С. 012082.
18. Ryabchikov A. I. et al. Regularities of plasma-immersion formation of long-pulse high-intensity titanium ion beams //Russian Physics Journal. – 2018. – Т. 61. – №. 7. – С. 1338-1346.
19. Ryabchikov A. et al. High intensity, low ion energy implantation of nitrogen in AISI 5140 alloy steel //Surface and Coatings Technology. – 2018. – Т. 355. – С. 129-135.
20. Ryabchikov A. I. et al. Ballistic formation of high-intensity low-energy gas ion beams //Review of Scientific Instruments. – 2020. – Т. 91. – №. 1. – С. 013326.
21. Ryabchikov A. I. et al. High-current-density gas ion ribbon beam formation //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A:

Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2018. – Т. 906. – С. 56-60.

22. Lopatin I. V. et al. Modification of stainless steel by low-energy focused nitrogen ion beam //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 1115. – №. 3. – С. 032041.

23. Koval N. N. et al. Low-energy high-current plasma immersion implantation of nitrogen ions in plasma of non-self-sustained arc discharge with thermionic and hollow cathodes //Surface and Coatings Technology. – 2018. – Т. 340. – С. 152-158.

24. Ryabchikov A. I. et al. Temperature gradients in targets at low energy high-intensity ion implantation //Surface and Coatings Technology. – 2020. – Т. 389. – С. 125656.

25. Lopatin I. V. et al. Low-energy plasma-immersion implantation of nitrogen ions in titanium by a beam with ballistic focusing //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 1115. – №. 3. – С. 032043.

26. Ryabchikov A. I. et al. Low energy implantation of nitrogen ions by extended beam with a ballistic focusing in a stainless steel //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1393. – №. 1. – С. 012125.

27. Ryabchikov A. I. et al. Modification of 40X13 steel at high-intensity nitrogen ion implantation //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 1115. – №. 3. – С. 032053.

28. Ryabchikov A. I. et al. Modification of the microstructure and properties of martensitic steel during ultra-high dose high-intensity implantation of nitrogen ions //Surface and Coatings Technology. – 2020. – Т. 388. – С. 125557.

29. Ryabchikov A. I. et al. Plasma-immersion formation of high-intensity gaseous ion beams //Vacuum. – 2019. – Т. 165. – С. 127-133.

30. Шульмин В. А., Усынина Т. С. Экономическое обоснование в дипломных проектах. – 2004.

31. Кнышова Е. Н., Панфилова Е. Е. Экономика организации: Учебник для вузов //М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М. – 2013.

32. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. От. 01.04.2019)

33. Федеральный закон «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний» от 24.07.1998 N 165-ФЗ (последняя редакция)

34. Федеральный закон «Об основах обязательного социального страхования» от 16.07.1999 N 165-ФЗ (последняя редакция)

35. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

36. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*

37. ГОСТ 12.1.019-2017. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

38. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности.

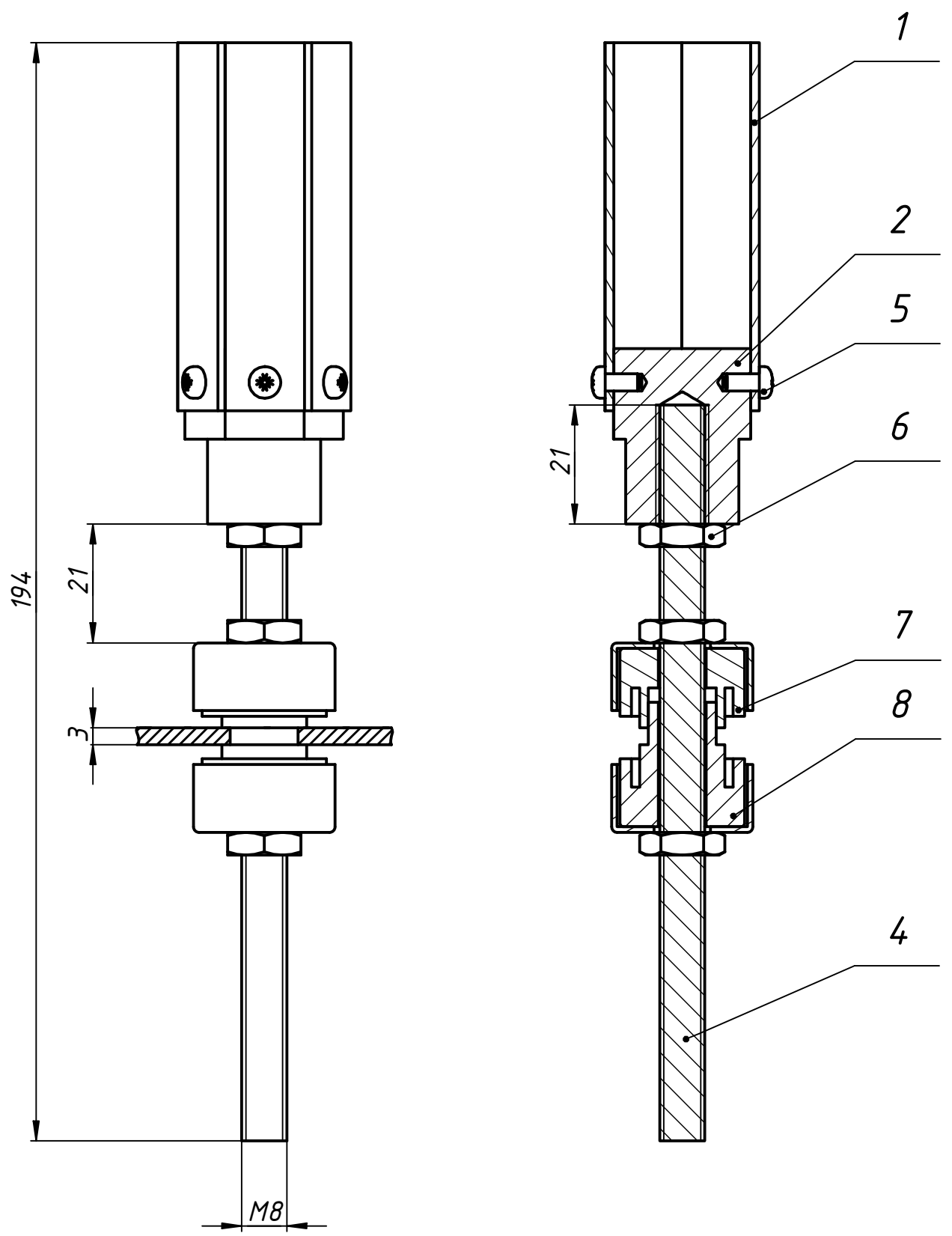
39. Беляков Г. И. Охрана труда и техника безопасности [Электронный ресурс]: учебник для прикладного бакалавриата/ГИ Беляков.—3-е изд., перераб. И доп.—Мультимедиа ресурсы (10 директорий; 100 файлов; 740МВ).— Москва: Юрайт, 2016.—1 Мультимедиа CD-ROM.—Бакалавр. Прикладной курс.— Электронные учебники издательства» Юрайт».— Электронная копия печатного издания.—Системные требования: Pentium 100 MHz, 16 Mb RAM //М.: Юрайт.– 2017. – Т. 404.

40. ГОСТ 12.1.038-82 с изм. от июня 2001 г. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.

41. ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление.

42. СНиП 21-01-97, дата актуализации 01.01.2021. Пожарная безопасность зданий и сооружений.

Перв. примен.
Справ. №
А
Подп. и дата
Инв. № дубл.
Взам. инв. №
Подп. и дата
Инв. № подл.

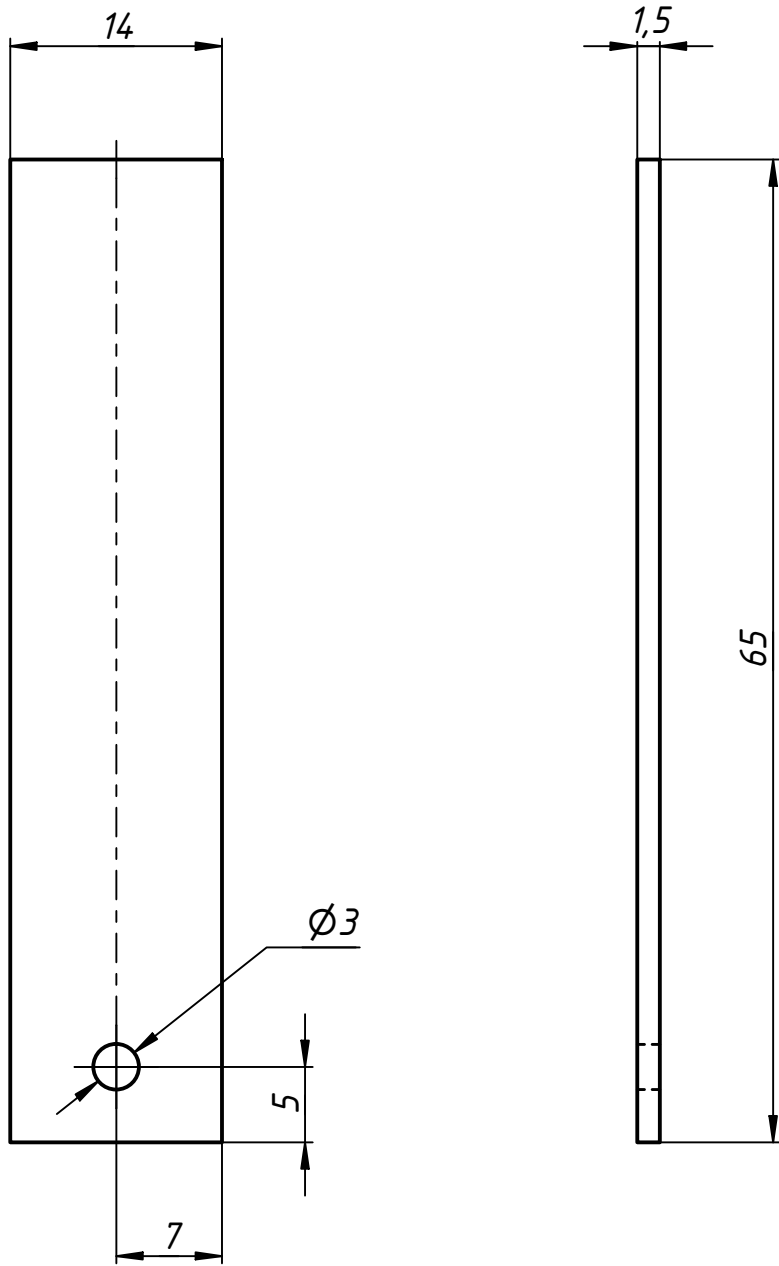


*Размер для справок

Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
				<u>Детали</u>		
A4		1		Образец	6	
A4		2		Держатель образцов	1	
A4		3		Защитный экран	2	
A4		4		Токоввод	1	
				<u>Стандартные изделия</u>		
		5		Болт М3х5	6	
		6		Гайка М8	3	
		7		Изолятор ответный	1	
		8		Изолятор входящий	1	

				Приложение А				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Коллекторный узел	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.		Гурулев А.В.		19.05.2021				1:1
Пров.		Сивин Д.О.						
Т. контр.						Лист	Листов	1
Н. контр.								
Утв.		Сивин Д.О.						

Приложение Б



Справ. №
Перв. примен.

Подп. и дата
Инв. № дубл.
Взам. инв. №

Подп. и дата
Инв. № подл.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Гурулев А.В.		18.05.2021
Пров.		Сивин Д.О.		
Т. контр.				
Нач.отд.				
Н. контр.				
Утв.		Сивин Д.О.		

Приложение Б

Образец

Лит.	Масса	Масштаб
		2:1
Лист 1	Листов 1	

Приложение В

Перв. примен.

Справ. №

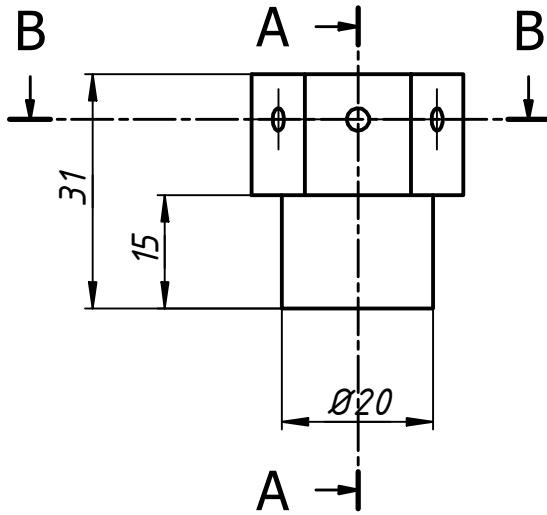
Подп. и дата

Инв. № дубл.

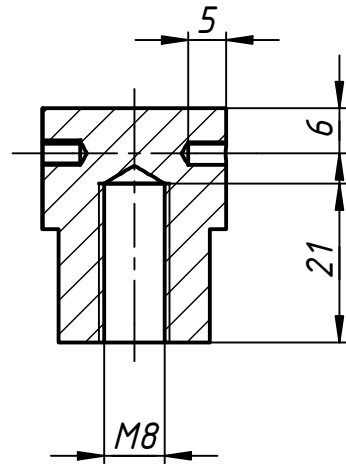
Взам. инв. №

Подп. и дата

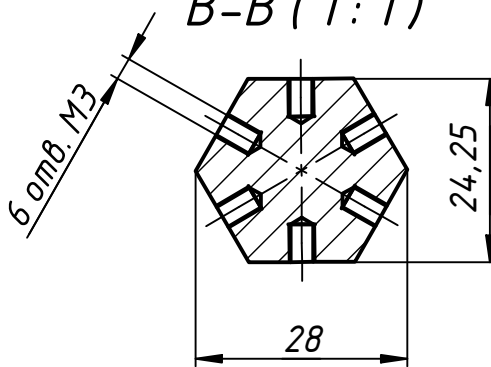
Инв. № подл.



A-A (1:1)



B-B (1:1)



Приложение В

Держатель образцов

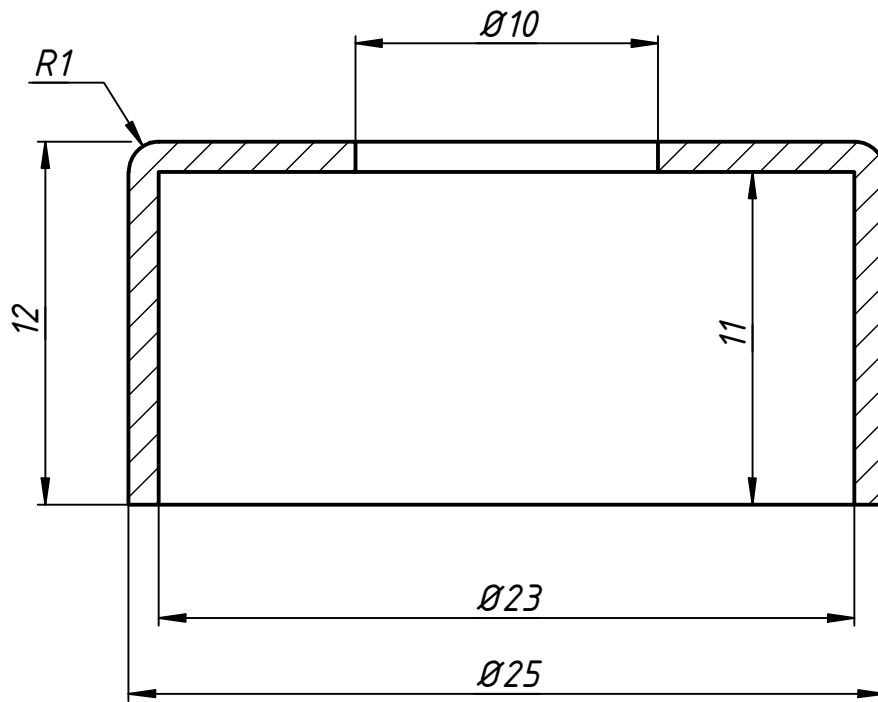
Лит.	Масса	Масштаб
		1:1
Лист 1	Листов 1	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Гурулев А.В.		19.05.2021
Пров.		Сивин Д.О.		
Т. контр.				
Нач.отд.				
Н. контр.				
Утв.		Сивин Д.О.		

Приложение Г

Перв. примен.

Справ. №



Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

Приложение Г

Защитный экран

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Гурулев А.В.		23.05.2021
Пров.		Сивин Д.О.		
Т. контр.				
Нач.отд.				
Н. контр.				
Утв.		Сивин Д.О.		

Лит.	Масса	Масштаб
		4:1
Лист	Листов	1

ᠮᠤ ᠠᠨᠠᠵᠣᠨᠢᠨᠠ

Перв. примен.

Справ. №

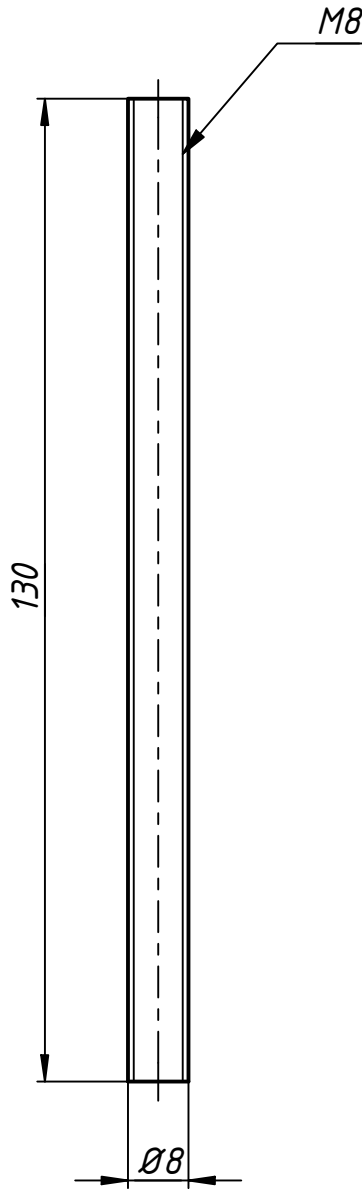
Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.



Приложение Д

Токоввод

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Гурулев А.В.		18.05.2021
Пров.		Сивин Д.О.		
Т. контр.				
Нач.отд.				
Н. контр.				
Утв.		Сивин Д.О.		

Лит.	Масса	Масштаб
		1:1
Лист 1	Листов 1	