

Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки – 14.03.02 Ядерные физика и технологии
 Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Влияние длительности азотирования при дуплексной обработке поверхности на свойства аустенитной стали 40x13

УДК 621.785.532:669.15-155.3

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А8Б	Воронина Екатерина Дмитриевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ Б.П. Вейнберга	Сиделёв Дмитрий Владимирович	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Якимова Татьяна Борисовна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Передерин Юрий Владимирович	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор НОЦ Б.П. Вейнберга	Блейхер Галина Алексеевна	д.ф.-м.н., доцент		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Код компетенции	Наименование компетенции
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(-ых) языке(-ах)
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций
УК(У)-9	Способен проявлять предприимчивость в практической деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи
ОПК(У)-1	Способен использовать базовые знания естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования
ОПК(У)-2	Способен осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из различных источников и баз данных, предоставлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий
ОПК(У)-3	Способен использовать в профессиональной деятельности современные информационные системы, анализировать возникающие при этом опасности и угрозы, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны
ПК(У)-1	Готов принимать участие в теоретических исследованиях в различных областях физики, связанных с современными высокотехнологическими

Код компетенции	Наименование компетенции
	способами энергетического воздействия на материалы, основанными на использовании радиационных и плазменных потоков, разрабатывать адекватные физические и математические модели изучаемых процессов
ПК(У)-2	Способен участвовать в экспериментальных исследованиях в различных областях физики, связанных с воздействием плазмы и пучков заряженных частиц на вещество, самостоятельно осваивать современную физическую аналитическую и технологическую аппаратуру, применять современные методы исследования свойств материалов и различных структур, проводить стандартные и сертификационные испытания технологических процессов, оборудования и изделий.
ПК(У)-3	Способен осуществлять самостоятельный поиск, изучение и использование научно-технической информации по тематике исследования, применять современные компьютерные технологии и информационные ресурсы в своей предметной области
ПК(У)-4	Способен проектировать плазменно-пучковые технологические процессы и оборудование для применения в научных исследованиях и промышленности
ПК(У)-5	Готов к участию в производственно-технологической деятельности, связанной с применением плазменных и пучковых технологий для обработки материалов и синтеза новых материалов (в том числе нанесению функциональных покрытий), определению основных параметров технологических процессов, анализу физических и механических свойств изделий и материалов.
ПК(У)-6	Способен применять современные цифровые технологии и пакеты прикладных программ для расчета технологических параметров, обосновывать принятие конкретного технического решения при разработке технологических процессов.
ПК(У)-7	Способен к контролю за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования

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

Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки – 14.03.02 Ядерные физика и технологии
 Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Блейхер Г.А.
 (Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
0А8Б	Вороной Е.А.

Тема работы:

Влияние длительности азотирования при дуплексной обработке поверхности на свойства аустенитной стали 40х13	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	Приказ № 47-2/с от 16.02.2022 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	15.06.2022
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектом исследования является аустенитная сталь 40х13, предметом исследования является совокупность структурных, механических и функциональных свойств поверхности стального изделия после дуплексной обработки.</p>
---	--

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Анализ литературных источников по теме дуплексной технологии обработки сталей, включающей осаждение покрытие в плазме магнетронного разряда и азотирования стальных изделий; постановка задачи исследования; исследование структурных, механических и функциональных свойств стали после дуплексной обработки; раздел «Финансовый менеджмент, ресурс эффективность и ресурсосбережение»; раздел «Социальная ответственность».</p>
--	--

<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Титульный лист. 2. Актуальность работы. 3. Постановка задачи работы. 4. Цели и задачи работы. 5. Экспериментальное оборудование. 6. Параметры дуплексной технологии. 7. Кристаллическая структура образцов. 8. Оптическая микроскопия шлифа. 9. Профилометрия поверхности. 10. Твёрдость покрытия по глубине. 11. Твердость стали по глубине. 12. Адгезионная прочность покрытия. 13. Износостойкость образцов. 15. Заключение.
--	---

<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p> <p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Консультант</p> <p>Якимова Татьяна Борисовна</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Передерин Юрий Владимирович</p>

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p>04.10.2021</p>
---	-------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Доцент НОЦ Б.П. Вейнберга</p>	<p>Сиделёв Дмитрий Владимирович</p>	<p>к.т.н.</p>		<p>04.10.2021</p>

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>0А8Б</p>	<p>Воронина Екатерина Дмитриевна</p>		<p>04.10.2021</p>

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А8Б	Воронойной Екатерине Дмитриевне

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	НОЦ Б.П. Вейнберга
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов в соответствии с рыночными ценами г. Томска. Тарифные ставки исполнителей в соответствии со штатным расписанием НИ ТПУ.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	- районный коэффициент - 1,3; - коэффициент дополнительной заработной платы - 1,15; - накладные расходы – 16%
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 30 %.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Анализ потенциальных потребителей результатов исследования. Исследование конкурентных технических решений. Проведение SWOT-анализа
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Определение трудоемкости работ. Разработка графика проведения научного исследования. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Оценка сравнительной эффективности проекта

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений	
2. Матрица SWOT	
3. Альтернативы проведения НИ	
4. График проведения и бюджет НИ	
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ	

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Якимова Татьяна Борисовна	К.Э.Н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А8Б	Воронина Екатерина Дмитриевна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа 0А8Б		ФИО Воронина Екатерина Дмитриевна	
Школа	ИЯТШ	Отделение (НОЦ)	НОЦ Б.П. Вейнберга
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии

Тема ВКР:

Влияние длительности азотирования при дуплексной обработке поверхности на свойства аустенитной стали 40х13	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
<p>Введение</p> <ul style="list-style-type: none"> – Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения. – Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации 	<p>Объектом исследования: покрытие CrAlN</p> <p>Область применения: машиностроение, автомобилестроение.</p> <p>Рабочая зона: НОЦ Б.П. Вейнберга, лаборатория 101</p> <p>Размеры помещения: 138 м²</p> <p>Наименование оборудования рабочей зоны: ПЭВМ, спиральный насос, турбомолекулярный насос, криогенный насос, вакуумная камера.</p> <p>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в зоне экспериментальной ионно-плазменной установки.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при эксплуатации:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> – ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ Оборудование производственное. Общие эргономические требования. – ГОСТ Р ИСО 6385-2016. Эргономика. Применение эргономических принципов при проектировании производственных систем.
<p>2. Производственная безопасность при эксплуатации:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов 	<p>Вредные производственные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Недостаточная освещенность рабочей зоны; – Повышенный уровень шума; – Повышенный уровень шума; – Химическое воздействие на организм человека. <p>Опасные производственные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Замыкание электрической цепи. <p>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов:</p>
<p>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при эксплуатации</p>	<p>Возможные ЧС:</p> <ul style="list-style-type: none"> – возникновение пожара, вследствие короткого замыкания или неправильного обращения с взрывоопасными газами.
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Передерин Юрий Владимирович	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А8Б	Воронина Екатерина Дмитриевна		

Реферат

Настоящая выпускная квалификационная работа содержит 106 страниц, 33 рисунка, 22 таблицы и 60 источников.

Ключевые слова: дуплексная технология, ионно-плазменное азотирование, магнетронное реактивное осаждение, адгезия.

Работа содержит введение, литературный обзор, экспериментальные методы и оборудование, экспериментальную часть, экономическую эффективность НТИ, социальную ответственность, заключение и список использованных источников литературы.

Объектом исследования является сталь 40х13, предметом – механические и функциональные свойства стали после дуплексной обработки.

Цель работы – исследование влияния длительности предварительного ионно-плазменного азотирования в высокочастотном (ВЧ) разряде на механические и функциональные свойства стали 40х13 при дуплексной обработке.

В результате работы показано, что ионно-плазменное азотирование в высокочастотном разряде способствует улучшению адгезионной прочности покрытия CrAlN на подложке из стали 40х13. Выявлено время обработки, при котором достигаются оптимальные параметры адгезионной прочности и износостойкости покрытия.

Оглавление

Реферат.....	8
Введение.....	12
1. Дуплексная технология обработки сталей	14
1.1 Магнетронное реактивное осаждение покрытий	15
1.1.1 Механизм роста тонких плёнок	15
1.1.2 Магнетронная распылительная система	17
1.1.3 Покрытие CrAlN.....	20
1.2 Азотирование стальных изделий	21
1.2.1 Газовое азотирование.....	23
1.2.2 Каталитическое газовое азотирование	24
1.2.3 Ионно-плазменное азотирование	25
1.2.4 Азотирование из растворов электролитов.....	26
1.3 Ионно-плазменное азотирование	27
1.3.1 Азотирование в плазме ВЧ разряда.....	29
1.3.2 Азотирование в плазме тлеющего разряда.....	30
1.3.3 Влияние параметров ИПА на свойства стали	32
2. Экспериментальные методы и оборудование	35
2.1 Вакуумная ионно-плазменная установка.....	35
2.2 Радиочастотный плазменный генератор РПГ-128.....	37
2.3 Методика пробоподготовки образцов.....	38
2.4 Изучение кристаллической структуры	39
2.5 Определение морфологии поверхности.....	41
2.6 Анализ микроструктуры поперечного сечения.....	42
2.7 Методика измерения твёрдости.....	43
2.7.1 Твёрдость покрытия по глубине	43
2.7.2 Твёрдость стали по глубине	44
2.8 Трибологические испытания.....	46
2.9 Изучение адгезии покрытий.....	47
3. Экспериментальная часть.....	50

3.1 Выбор режимов дуплексной обработки.....	50
3.2 Кристаллическая структура образцов	51
3.3 Микроструктура поперечного сечения	52
3.4 Твёрдость образцов.....	54
3.4.1 Твёрдость покрытия по глубине	54
3.4.2 Твёрдость стали по глубине	55
3.5 Морфология поверхности	56
3.6 Адгезия покрытия.....	56
3.7 Износостойкость поверхности образцов	59
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	61
Введение.....	61
4.1 Потенциальные потребители результатов исследования	61
4.2 Анализ конкурентных технических решений	62
4.3 SWOT – анализ	63
4.4 Планирование научно-исследовательских работ.....	64
4.4.1 Структура работ в рамках научного исследования	64
4.4.2 Определение трудоемкости выполнения работ	64
4.4.3 Разработка графика проведения научного исследования	66
4.5 Бюджет научно-технического исследования	68
4.5.1 Материальные затраты НТИ	68
4.5.2 Амортизационные отчисления	69
4.5.3 Основная заработная плата исполнителей	70
4.5.4 Дополнительная заработная плата исполнителей	71
4.5.5 Отчисления во внебюджетные фонды	72
4.5.6 Накладные расходы.....	72
4.5.7 Бюджет затрат НТИ	72
4.6 Определение ресурсной эффективности исследования	73
Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».....	77

5. Социальная ответственность.....	78
Введение.....	78
5.1 Правовые вопросы обеспечения безопасности	78
5.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства	78
5.1.2 Организация рабочей зоны исследователя.....	79
5.2 Производственная безопасность.....	81
5.2.1 Опасные и вредные производственные факторы	82
5.2.2 Снижение воздействия опасных и вредных факторов	92
5.3 Пожаровзрывобезопасность	93
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	95
Вывод по разделу Социальная ответственность.....	98
Заключение	99
Список используемой литературы	101

Введение

Стали с содержанием хрома и никеля широко используются в промышленном и производственном секторе. Так, сталь 40х13 обладает хорошей коррозионной стойкостью, но низкая твёрдость и износостойкость данной стали серьёзно ограничивает область её применения [1]. Уже разработано и применяется множество методов модификации поверхности для повышения твёрдости и износостойкости материалов, таких как цементация [2], нанесение покрытий [3], азотирование [4] и др. Для нанесения покрытий применяются методы лазерной абляции, термического испарения и магнетронного распыления, последнее выделяется управляемостью, повторяемостью процесса и разнообразием осаждаемых материалов. Однако, существует проблема низкой адгезионной прочности между осаждённым покрытием и материалом подложки, обусловленная несовпадением механических характеристик покрытия и подложки. Для устранения проблемы низкой адгезии можно дополнительно включить в технологию нанесения покрытий предварительное упрочнение поверхности подложки, с целью компенсации разницы в твёрдости покрытия и подложки. В качестве предварительной обработки может быть применен один из методов азотирования поверхности изделия.

В настоящее время существует несколько видов азотирования, такие как: газовое, азотирование в жидких или солевых ваннах, плазменное азотирование. Плазменное азотирование выгодно отличается от других методов азотирования из-за высокой экологичности процесса и его управляемости. В качестве управляющих параметров плазменного азотирования обычно используются температура, потенциал смещения на изделии, время азотирования, общее давление и состав газовой смеси.

Комбинация методов плазменного азотирования и нанесения покрытий (последовательно) носит название дуплексной технологии. Применение данной технологии в промышленности увеличивает срок эксплуатации детали,

улучшая её трибологическое поведение и прочностные характеристики [5]. Однако при азотировании изделий изменяется морфология поверхности, что может оказывать существенное влияние на адгезию покрытия, осаждаемого на азотированную поверхность. Требуется выполнить оценки того, как длительность предварительного ионно-плазменного азотирования (ИПА) влияет на функциональные свойства поверхности, подвергнутой дуплексной обработке.

Проблема исследования заключается в недостатке исследований, связанных с влиянием длительности ИПА на адгезию покрытий к материалу изделия в условиях больших механических и тепловых нагрузок.

Актуальностью исследования является поиск оптимальных условий дуплексной обработки изделий из стали, на примере стали 40х13, с целью увеличения её функциональных параметров.

Цель – исследование влияния длительности предварительного ионно-плазменного азотирования в высокочастотном (ВЧ) разряде на механические и функциональные свойства стали 40х13 при дуплексной обработке.

Объект исследования – сталь 40х13.

Предметом исследования является совокупность структурных, механических и функциональных свойств поверхности стального изделия после дуплексной обработки.

Для решения проблемы исследования поставлены следующие *задачи*.

1. Подбор режимов дуплексной обработки стали 40х13.
2. Проведение процесса ионно-плазменного азотирования в плазме ВЧ разряда при различной длительности процесса (10, 20, 40 и 60 минут) с последующим нанесением покрытия CrAlN методом магнетронного осаждения.
3. Изучение структурных, механических и функциональных свойств, полученных покрытия и модифицированного слоя.
4. Анализ полученных результатов и их обсуждение.

1. Дуплексная технология обработки сталей

Дуплексная технология обработки поверхности включает последовательное применение двух (или более) технологий обработки для получения поверхностного слоя с комбинированными свойствами, которые недоступны при применении любой технологии обработки поверхности в отдельности [5].

Дуплексная технология активно применяется для обработки стальных изделий в отраслях автомобилестроения, энергетики и машиностроения. Несмотря на относительно высокие отношение прочности к плотности, хорошую коррозионную стойкость и низкую себестоимость сталей, их основным недостатком является низкая твёрдость и, следовательно, низкая стойкость к абразивному износу. Для улучшения механических и трибологических свойств стальных изделий широко применяются как методы нанесения покрытий, так и методы поверхностного упрочнения – азотирование и цементация. Поверхностное упрочнения зачастую приводит к проблеме снижения коррозионной стойкости ввиду формирования пористой микроструктуры модифицированного слоя. В случае нанесения покрытий значимой является проблема низкой адгезии поверхности из-за сильной пластической деформации стальной подложки в сравнении с твёрдым покрытием. Устойчивость к высоким нагрузкам в системе «покрытие–подложка» значительно зависит от соотношения механических свойств материалов покрытия и подложки. Упрочнение поверхностного слоя подложки может значительно повысить способность системы выдерживать высокие механические нагрузки. В качестве упрочняющих методов чаще всего применяется азотирование поверхности.

В настоящей работе дуплексной технологией обработки поверхности называется совокупность методов ионно-плазменного азотирования в высокочастотном (ВЧ) разряде и нанесения покрытия CrAlN методом магнетронного реактивного осаждения.

На рисунке 1.1 представлен рисунок профиля изделий после дуплексной обработки поверхности. Профиль включает материал подложки, азотированный слой и осаждённую плёнку.

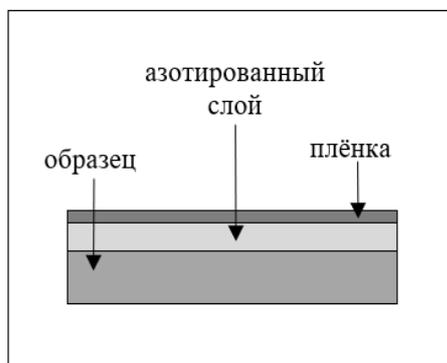


Рисунок 1.1 – Изображение профиля изделий после дуплексной обработки поверхности

Рассмотрим основные принципы нанесения покрытий методом магнетронного реактивного осаждения и поверхностного упрочнения с помощью ионно-плазменного азотирования.

1.1 Магнетронное реактивное осаждение покрытий

1.1.1 Механизм роста тонких плёнок

Процесс нанесения тонких пленок в вакууме состоит в формировании потока частиц, направленного в сторону обрабатываемой подложки, и последующей их конденсации с образованием тонкоплёночных слоёв на покрываемой поверхности. Таким образом, при нанесении тонких плёнок одновременно протекают три основных процесса: генерация направленного потока частиц осаждаемого вещества, пролёт частиц в разряженном (вакуумном) пространстве от источника к обрабатываемой поверхности, осаждение (конденсация) частиц на поверхности с образованием тонкоплёночных слоёв [6].

В соответствии с этим вакуумные установки для нанесения тонких пленок, несмотря на многообразие их назначений и конструктивного оформления, состоят из следующих основных элементов: источника генерации

потока частиц осаждаемого материала (мишени), вакуумной системы, включающей в себя системы откачки вакуума и герметичную камеру, позиционирующих устройств, обеспечивающих ввод подложек в зону нанесения плёнок и ориентирование обрабатываемых поверхностей относительно потока частиц наносимого материала.

При нанесении тонких плёнок в вакууме процесс роста пленки на подложке состоит из двух основных этапов: начального и завершающего.

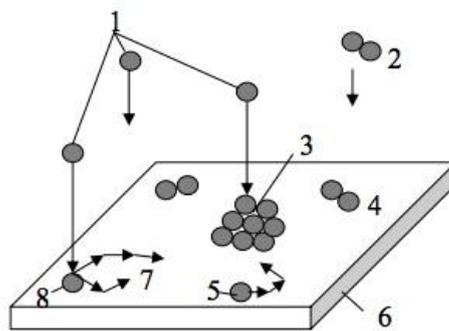


Рисунок 1.2 – Механизм взаимодействия осаждаемых частиц с подложкой: 1 – частицы в вакуумном пространстве, 2 – дуплет частиц, 3 – центр кристаллизации, 4 – адсорбированный дуплет частиц, 5 – рост кристаллита за счет мигрирующих частиц, 6 – подложка, 7 – поверхностная миграция частиц, 8 – адсорбированная частица [6]

Покинувшие поверхность мишени частицы (1) вещества движутся через вакуумное пространство к подложке (6) и достигают её поверхности, передавая при столкновении часть своей энергии (частица (8)). Сохранив при этом некоторый избыток энергии, частица (8) вещества способна перемещаться (мигрировать) по поверхности подложки, как это показано ломаными стрелками (7).

При миграции по поверхности частица постепенно теряет избыток своей энергии, стремясь к тепловому равновесию с подложкой, и при этом может произойти следующее. Если на пути движения частица потеряет избыток своей энергии, то она фиксируется на подложке (конденсируется). Встретив же на пути движения другую мигрирующую частицу (или группу частиц), она вступит с ней в сильную связь (металлическую), создав адсорбированный

дуплет (4). При достаточно крупном объединении такие частицы полностью теряют способность мигрировать и фиксируются на подложке, становясь центром кристаллизации (3).

Вокруг отдельных центров кристаллизации происходит рост кристаллитов, которые впоследствии срастаются и образуют сплошную пленку. Рост кристаллитов происходит как за счет мигрирующих по поверхности частиц (5), так и в результате непосредственного осаждения частиц (1) на поверхность кристаллитов. Возможно также образование дуплетов (2) в вакуумном пространстве при столкновении двух частиц, которые в конечном итоге адсорбируются на подложке. Различные загрязнения в виде пылинок и следов органических загрязнений существенно искажают процесс роста пленок и ухудшают их качество.

Образованием сплошной пленки заканчивается начальный этап процесса. Так как с этого момента качество поверхности подложки перестает влиять на свойства наносимой пленки, начальный этап имеет решающее значение в их формировании. На завершающем этапе происходит рост плёнки до необходимой толщины.

1.1.2 Магнетронная распылительная система

Магнетронное распыление как явление было впервые открыто в 1970-х годах. В процессе магнетронного распыления атомы или молекулы материала покидают поверхности мишени путем их бомбардировки высокоэнергичными ионами инертного газа. Метод магнетронного распыления обладает рядом важных преимуществ по сравнению с другими методами нанесения вакуумных покрытий, что привело к разработке большого количества применений метода – от изготовления микроэлектроники до создания декоративных покрытий.

Выделим основные преимущества магнетронного распыления:

- высокая скорость осаждения;
- простота распыления металлов, сплавов или соединений;
- высокая чистота получаемых плёнок;

- сравнительно высокая адгезия плёнок;
- возможность нанесения покрытия на термочувствительные поверхности;
- простота автоматизации;
- однородность плёнок на подложках большой площади.

На рисунке 1.3 представлена схема магнетронного диода в дисковом исполнении. Он состоит из мишени, материал которой распыляется, магнитной системы (система постоянных магнитов и магнитопровод), анода и системы охлаждения.

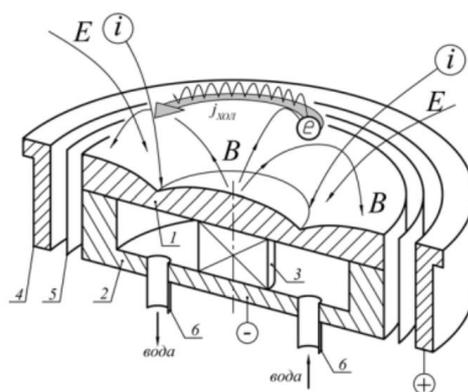


Рисунок 1.3 – Магнетронный диод: 1 – катод, 2 – магнитопровод, 3 – магнит, 4 – анод, 5 – электростатический экран, 6 – штуцера для подачи воды [7]

При работе магнетронной распылительной системы на катод подается отрицательное напряжение с амплитудой от 300 В и выше. Между катодом и анодом (эту функцию могут выполнять стенки камеры) возникает электрическое поле, вызывающее эмиссию электронов с поверхности мишени и их движение к аноду. На своём пути электроны ионизируют атомы рабочего газа, передавая им всю энергию. Арочное магнитное поле над поверхностью катода образует «ловушку» для электронов, существенно усложняя и удлиняя траекторию их движения, локализуя процесс ионизации атомов рабочего газа у поверхности мишени.

Положительно заряженные ионы ускоряются в сторону мишени, набирая при этом значительную энергию, и бомбардируют её. В качестве

рабочего газа обычно используют аргон или его смесь с реактивными газами. Ускоренные ионы, падая на поверхность мишени, испытывают упругие и неупругие столкновения с атомами решётки. В результате которых частица, лежащая на поверхности, может получить импульс, направленный в сторону подложки и покинуть поверхность мишени при условии, если переданная энергия выше порогового значения энергии связи для данного материала мишени.

Для большинства материалов энергия связи атомов в кристаллической решётке составляет $\sim 10-30$ эВ, а энергия расплывённого атома не превышает $\frac{1}{2}$ от поверхностной энергии связи атомов (менее 15 эВ). Учитывая то, что мишень бомбардируется ионами с энергиями $\sim 0,3-1$ кэВ, а коэффициент распыления большинства металлов составляет от 1 до 5, то на распыление тратится лишь незначительная доля энергии падающих ионов, а остальная её часть рассеивается, вызывая нагрев мишени.

Выделяют несколько механизмов взаимодействия ускоренных положительных ионов с атомами на поверхности мишени. Так, если энергия, передаваемая атому мишени, больше его энергии связи в решетке, то может происходить либо первичное выбивание атома мишени, либо каскад столкновений атомов решетки с другими атомами. Третий процесс, реализуемый при ионной бомбардировке мишени – её нагрев, в ходе которого частицы, с достаточным количеством энергии покидают поверхность мишени и летят в направлении к подложке.

Процесс магнетронного распыления практически не имеет ограничений по типу распыляемых материалов (мишеней), начиная от чистых металлов, для которых можно использовать постоянный ток, и заканчивая полупроводниками и изоляторами, для которых требуется либо радиочастотное питание, либо импульсный постоянный ток. Осаждение может осуществляться как в неактивном (только инертный газ), так и в реактивном (инертный и реактивный газ) разряды с одиночными или многоэлементными мишенями [8].

1.1.3 Покрытие CrAlN

Покрытия CrAlN активно применяются в промышленности для продления срока службы режущих инструментов благодаря их высоким значениям твёрдости, износостойкости и коррозионной стойкости [9]. Сравним функциональные и механические свойства CrAlN и CrN покрытий.

Твёрдость и модуль Юнга осажденных покрытий CrAlN выше, чем у бинарного покрытия CrN, нанесенного в аналогичных условиях. Высокая твёрдость покрытий CrAlN может быть обусловлена следующими факторами: малое межатомное расстояние, упрочнение механизмом внедрения и малый размер кристаллитов. Значения твердости покрытий CrAlN, полученных методом магнетронного реактивного осаждения обычно лежат в диапазоне 26 – 37 ГПа, а модуль Юнга варьируется в диапазоне 270 - 370 ГПа [10], [11], наличие широкого диапазона твёрдости связано с атомным соотношением Al/Cr в покрытиях.

Износостойкость покрытий CrAlN более чем в шесть раз выше, чем у покрытия CrN, нанесенного в аналогичных условиях, так скорость износа для покрытий CrN и CrAlN составляет $45 \cdot 10^{-7}$ и $> 7 \cdot 10^{-7}$ мм³/Н·м, соответственно. [10].

Сравнение коррозионной стойкости стали, CrN и CrAlN проводили в работе [12]. Плотность тока коррозии необработанной стали был равен 16,7 мкА/см², покрытия CrN – 6,95 мкА/см² и покрытия CrAlN – 1,03 мкА/см². Скорость коррозии пропорциональна плотности тока коррозии. Следовательно, уменьшение тока коррозии приводит к улучшению коррозионной стойкости.

Сравнительный анализ твёрдости, износостойкости и коррозионной стойкости покрытий CrAlN и CrN показал, что во всех трёх случаях механические и функциональные свойства CrN уступают свойствам CrAlN. Рассмотрим применение покрытий CrAlN в промышленных областях.

Так как системы Cr-Al-N обладают высокими механическими и функциональными свойствами, их активно используют в качестве защитных

покрытий на изделиях, работающих в агрессивных условиях (например, покрытия на насосы, клапаны и подшипники для морских судов [13]), высокая твёрдость покрытия позволяет использовать их для штамповки перфорированных листов [14], а сравнительно высокая коррозионная стойкость – в качестве защитных покрытий на топливные элементы [15].

1.2 Азотирование стальных изделий

Азотированием называется процесс химико-термической обработки, при котором осуществляется насыщение поверхности изделий атомами азота в азотосодержащей среде [16]. Азотирование применяют для повышения твёрдости, усталостной прочности, износостойкости и коррозионной стойкости поверхности таких изделий, как: коленчатые валы, шестерни, гильзы цилиндров и др. Насыщение поверхности азотом может происходить в различных средах, поэтому выделяют несколько способов: газовое, ионно-плазменное и азотирование из растворов электролитов. Данные технологические процессы могут сильно отличаться между собой параметрами (температура, время азотирования, состав среды азотирования). Изображения различных технологических реализаций процесса азотирования представлены на рисунке 1.4.

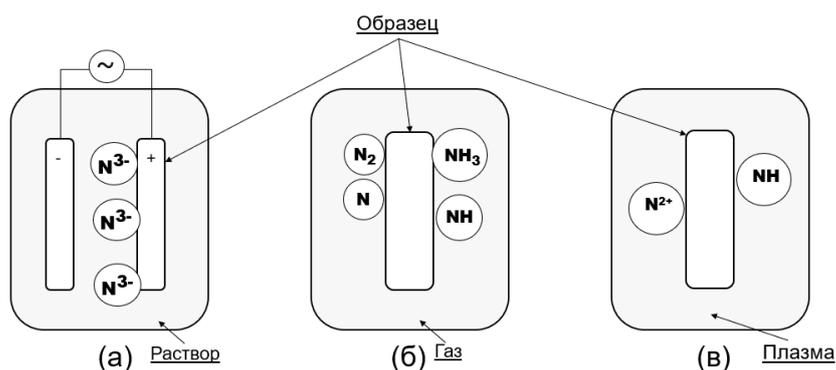


Рисунок 1.4 – Схематическое изображение различных процессов азотирования:

а – азотирование из растворов электролитов, б – газовое азотирование, в – ионно-плазменное азотирование

Для прогнозирования структуры поверхностного слоя стальных изделий после азотирования применяется диаграмма состояния железо–азот, представленная на рисунке 1.5.

В соответствии с диаграммой состояния, система Fe-N содержит твёрдые фазы азотистого феррита α и аустенита γ , и твёрдые растворы γ' -Fe₄N и ϵ -Fe₂₋₃N.

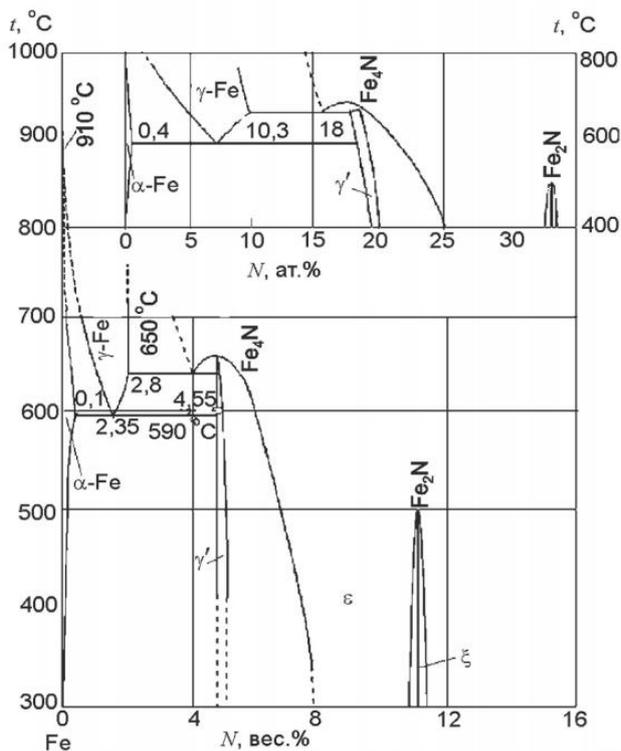


Рисунок 1.5 – Диаграмма состояния железо–азот [17]

При незначительном содержании азота в железе (0,004 масс. % азота) и температуре ниже 910 °С образуется твёрдая фаза азотистого феррита с объемноцентрированной (ОЦК) решёткой. Фаза азотистого аустенита с гранецентрированной (ГЦК) решеткой стабильна при температуре выше 600 °С в широком диапазоне концентраций.

Наибольшую практическую значимость, из-за повышенной твёрдости, представляют твердые растворы γ' -Fe₄N с ГЦК-решеткой и ϵ -Fe₂₋₃N с плотной гексагональной упаковкой атомов. Фаза γ' имеет узкую зону гомогенности в пределах 5,3–5,75 масс. % азота. Эта фаза устойчива только до 670 °С и при более высокой температуре превращается в ϵ -фазу. При массовой

концентрации азота в железе в диапазоне 4,55-11 масс. % азота формируется ϵ -фаза.

Перечисленные выше фазы образуются при азотировании деталей из железа с низкой концентрацией нитридообразующих легирующих элементов, например из аустенитных или ферритных сталей. Сталь, имеющая в поверхностном слое γ' и ϵ фазы, обладает высокой твёрдостью (до 1400 HV) и стойкостью к износу. Тогда как α – и γ – фазы имеют сравнительно невысокую твёрдость (100 и 300 HV по Виккерсу).

При азотировании выделяют несколько проблем, общих для большинства технологий азотирования.

1. Образование белого нитридного слоя, являющегося чрезвычайно твёрдым и хрупким одновременно. Белый слой удаляется после проведения процесса азотирования шлифованием абразивной бумагой, что может не подходить для деталей сложной формы. В качестве альтернативы используют химическое растворение путем замачивания в горячем растворе цианида, что не безопасно для человека и окружающей среды.
2. Образование оксидной плёнки на поверхности изделия до начала азотирования приводит к низким значениям толщины диффузионной зоны. Этого можно избежать, обеспечив качественную предварительную очистку поверхности изделия и герметичность камеры.
3. Рост шероховатости поверхности в процессе азотирования. В процессе диффузионного насыщения поверхности, внедряемый атомарный азот создает дефекты в кристаллической структуре изделия, изменяется фазовый состав и кристаллическая структура. Все эти факторы влияют на изменение морфологии поверхности азотируемого изделия.

1.2.1 Газовое азотирование

При газовом азотировании в качестве насыщающей атмосферы выступает аммиак NH_3 , который на первой стадии при температурах от 400 °C

диссоциирует на нагретой поверхности стали, с образованием водорода и азота, как показано в уравнении (1.1).



Вторая стадия включает в себя диссоциацию молекулы азота на 2 атома и последующее внедрение в поверхностный слой изделия, как показано в уравнении (1.2).



В результате взаимодействия азота с изделием образуются растворы, увеличивающие твёрдость и износостойкость поверхностного слоя. Установка для проведения процесса газового азотирования содержит следующие элементы: рабочая камера, нагревательная печь и баллон с аммиаком. Для регулирования параметров давления и температуры также могут присутствовать манометры и термометры. В качестве оборудования для газового азотирования применяют два класса печей. К первому классу относятся шахтные, муфельные и камерные электропечи сопротивления (ЭПС) периодического действия (садочные), тогда как толкательные и карусельные – ко второму классу печей непрерывного действия (методические) [16].

Технология газового азотирования позволяет создать твёрдый нитридный слой на поверхности изделий, увеличивая стойкость к износу и коррозии. Благодаря простоте реализации газовое азотирование широко распространено в промышленном секторе. Однако существенным недостатком метода является большая длительность процесса обработки (20-60 часов) и его неконтролируемость.

1.2.2 Каталитическое газовое азотирование

Данный вид азотирования можно отнести к модифицированной технологии газового азотирования, при которой диссоциация аммиака происходит на катализаторе в рабочем пространстве печи. Катализатор представляет собой нагревательный элемент, при взаимодействии молекул

аммиака, с которым происходит его диссоциация и ионизация. Диссоциация и ионизация аммиака представляет собой процессы распада молекулы на нейтральные атомы и образование азот-, водород-, кислородосодержащих радикалов и ионов.

При каталитическом азотировании применяются те же печи, что и при традиционном газовом азотировании, которые оснащены встроенными катализаторами с активными компонентами из платиновой группы. Степень диссоциации аммиака в данном случае напрямую зависит от температуры прохождения реакции и активности катализатора. Температура на катализаторе может быть равна температуре в печи, а может быть выше, в случае комплектования дополнительным подогревателем реактора с катализатором.

Применение катализаторов при газовом азотировании позволяет сократить длительность процесса в 2-4 раза, однако нерешёнными остаются проблемы, связанные с контролируемостью и управляемостью процесса [18].

1.2.3 Ионно-плазменное азотирование

Процесс ионно-плазменного азотирования основан на насыщении поверхности изделий азотом и его ионами в азотосодержащей плазме. Важным достоинством плазменного азотирования является способность ионизированного газа активировать наиболее трудно поддающиеся азотированию ОЦК-сплавы, содержащие значительные количества хрома и других элементов и обеспечивающие хемосорбцию активных форм азота на поверхности. Так как энергия внедряющихся частиц при плазменном азотировании значительно выше, по сравнению с другими методами, этот способ может быть использован также для азотирования ГЦК-металлов, таких как никель или титан.

Во время процесса плазменного азотирования энергия ионов и нейтральных частиц, бомбардирующих поверхность изделия, достаточна не только для удаления оксидов, пассивирующих поверхность, но и для

значительного распыления изделия, что влияет на получение развитой шероховатости поверхности после азотирования.

Различают несколько видов ионно-плазменного азотирования в зависимости от вида газового разряда:

- азотирование в тлеющем разряде;
- азотирование с использованием высокочастотного (ВЧ) разряда.

Различие представленных выше методов азотирования состоит в способе получения плазмы. Из преимуществ метода ионно-плазменного азотирования выделяют экономичность, хорошую управляемость процессом, высокую производительность.

1.2.4 Азотирование из растворов электролитов

Отличительной особенностью данного вида азотирования является рабочая среда, которая представлена в виде расплавленной соли (традиционно – цианида калия). Анодом выступает деталь, на которую подают напряжение от 150 до 300 В, далее происходит нагрев солевой ванны, расплав погруженных в неё солей и диффузия радикалов азота в поверхность изделия. Процесс азотирования обычно происходит при температурах от 450 до 1050 °С.

Преимущество данного метода заключается в его высокой производительности (время азотирования обычно варьируется в диапазоне от 30 мин до 3 часов). Однако, данная технология считается самой «грязной» из всех ранее озвученных. Ванны с расплавленной солью остаются нагретыми постоянно. Поэтому данная технология сопряжена с большим числом опасных газовых и жидких отходов.

В представленном разделе рассмотрены основные виды азотирования сталей: газовое азотирование, каталитическое азотирование, ионно-плазменное азотирование и азотирование из растворов электролитов. При анализе методов азотирования выявлены их достоинства и недостатки. Так наиболее распространенным является газовое азотирование, вследствие простоты реализации данного метода. Однако существенными недостатками данного

метода является низкая управляемость процессом и высокая длительность обработки. Для снижения времени азотирования возможно применение катализатора для предварительной диссоциации молекулы аммиака – каталитическое газовое азотирование, что способствует снижению длительности химической обработки в 4-5 раз. Быстрым и простым способом получения упрочняющего слоя является азотирование в солевых ваннах, однако данный метод является экологически вредным и опасным. Ионно-плазменное азотирование является наиболее перспективным методом упрочнения поверхности деталей, вследствие его производительности и контролируемости, благодаря большому количеству управляющих параметров.

1.3 Ионно-плазменное азотирование

Ионно-плазменное азотирование (ИПА) – это разновидность химико-термической обработки изделий, обеспечивающая диффузионное насыщение поверхностного слоя материала азотом в плазме при температуре 400-600 °С. Преимуществом данного процесса является его управляемость и экологичность. Диффузионное насыщение поверхностного изделия преимущественно зависит от мощности газового разряда и температуры, следовательно, изменяя данные параметры можно добиться требуемой скорости роста диффузионного слоя.

Схематично процесс ионно-плазменного азотирования представлен на рисунке 1.6. Модель из рисунка 1.6 показывает, что молекулярные ионы и нейтральные частицы азота играют основную роль в процессе ионно-плазменного азотирования. Они диссоциируют при ударе о поверхность с образованием N, который впоследствии хемосорбируется на поверхности изделия или N⁺, который имплантируется.

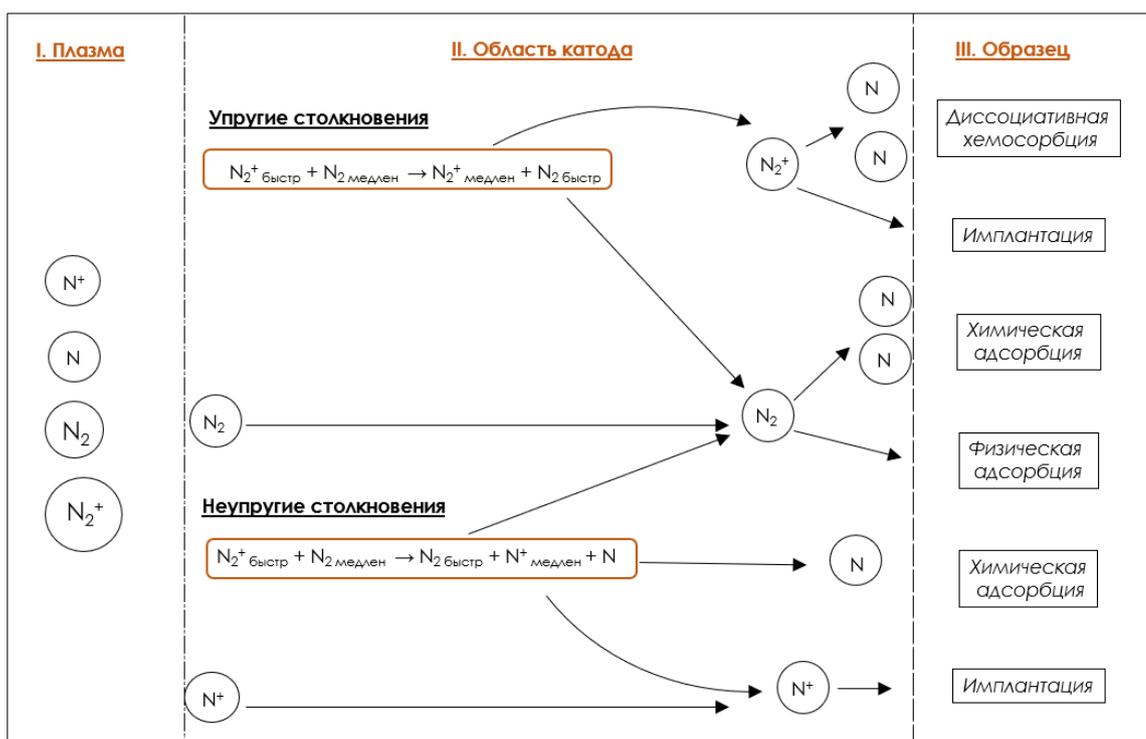


Рисунок 1.6 – Схема процесса ионно-плазменного азотирования [19]

В механизме ионно-плазменного азотирования принимают участие процессы упругого и неупругого взаимодействия ионов/атомов азота, а также бесстолкновительные процессы. При упругих столкновениях ионов и атомов происходит передача импульса без изменения внутреннего состояния сталкивающихся частиц. При неупругих столкновениях происходит изменение внутреннего состояния с превращением в другие частицы или рождением новых. В ходе упругих и неупругих столкновений выделяют процессы диссоциативной хемосорбции, имплантации, физической и химической адсорбции.

Согласно проведенному анализу литературы, выделим три основных стадии процесса ионно-плазменного азотирования:

1. Диссоциация молекулярного азота и его ионизация;
2. Физическая и химическая адсорбция, имплантация азота на поверхности изделия;
3. Процесс диффузии полученных ионов, молекул и атомов азота в материал.

В зависимости от вида газового разряда различают азотирование в тлеющем разряде и азотирование с использованием высокочастотного (ВЧ) разряда.

1.3.1 Азотирование в плазме ВЧ разряда

Для создания плазмы высокочастотного (ВЧ) разряда необходимо прохождение тока высокой частоты (13,56 МГц) через катушку индуктивности плоской или цилиндрической формы. Изменение полярности переменного тока порождает высокочастотное магнитное переменное поле, которое является причиной появления ВЧ электромагнитного поля. Свободные электроны, находящиеся под воздействием электромагнитного поля, начинают осциллировать. По причине малого периода колебания (70 нс), электрон практически мгновенно передает энергию порядка 20-50 эВ атомам рабочего газа (Ar и N₂), возбуждая и ионизируя их. Далее порядок внедрения атомов и ионов азота в поверхностный слой изделия протекает по механизму, показанному на рисунке 1.6.

Катушка, через которую проходит ВЧ ток не является катодом, а представлена в виде дополнительного (усиливающего) элемента для возникновения ионного тока.

Для реализации азотирования в ВЧ плазме используют источники с индуктивно связанной плазмой (антенной) и ёмкостные. На рисунке 1.7 представлена схема установки для азотирования в плазме ВЧ разряда.

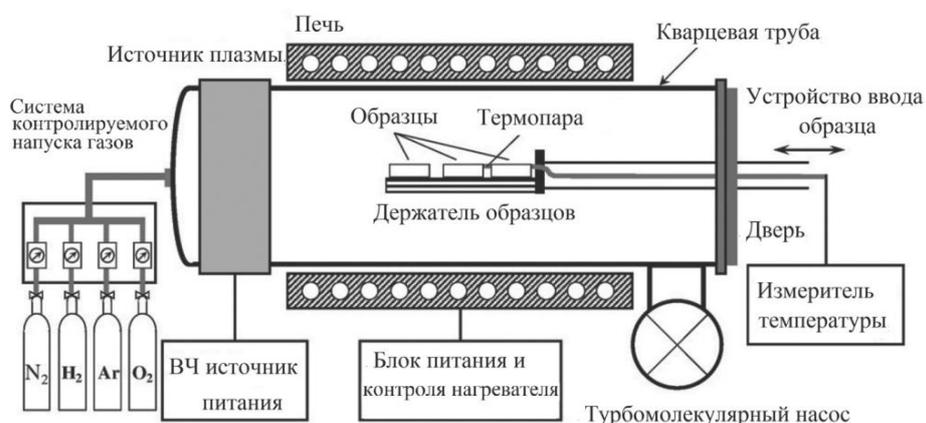


Рисунок 1.7 – Схема установки для ВЧ плазменного азотирования [7]

В работе [20] азотирование проводилось в атмосфере азота и водорода. Мощность ВЧ источника плазмы составила 750 Вт со стандартной частотой 13,56 МГц. Вакуум поддерживался турбомолекулярным насосом, который обеспечивал рабочее давление 7,5 Па. Нагрев образцов осуществлялся внешним нагревателем, поддерживающим заданную температуру независимо от температурного влияния плазмы. При нагревании давление в камере может повышаться за счет дегазации образца и внутренней оснастки вакуумной камеры, стенок и др.

1.3.2 Азотирование в плазме тлеющего разряда

Тлеющий разряд возникает при низких давлениях. На рисунке 1.8 представлена стеклянная трубка с впаянными электродами, внутри которой формируется тлеющий разряд [21].

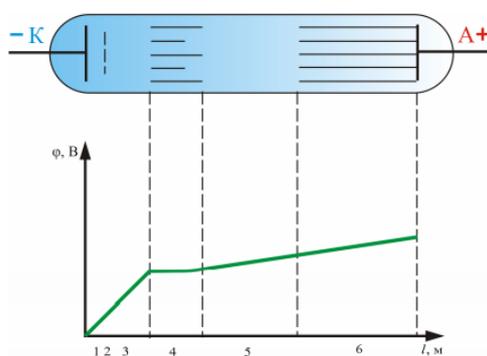


Рисунок 1.8 – Изображение стеклянной трубки, внутри которой возникает тлеющий разряд: 1 – астоново тёмное пространство; 2 – катодная светящаяся плёнка; 3 – катодное тёмное пространство; 4 – область тлеющего свечения; 5 – фарадеево тёмное пространство, 6 – положительный столб [21]

Вблизи катода располагается тонкий светящийся слой (2), называемый катодной светящейся пленкой. Между катодом и пленкой находится астоново темное пространство (1). Справа от светящейся пленки помещается слабо светящийся слой, называемый катодным темным пространством (3). Этот слой переходит в светящуюся область, которую называют тлеющим свечением (4), с

тлеющим пространством граничит тёмный промежуток – фарадеево тёмное пространство (5). Все перечисленные слои образуют катодную часть тлеющего разряда. Вся остальная часть трубки заполнена святящимся газом. Эту часть называют положительным столбом (6).

На рисунке 1.8 видно, что практически все падение потенциала приходится на первые 3 участка тлеющего разряда, эту часть напряжения принято называть катодным падением потенциала.

Разность потенциалов ускоряет положительные ионы рабочего газа, которые начинают бомбардировать катод, выбивая из него электроны. Только что вылетевший электрон попадает в астоново темное пространство и ускоряется по направлению от катода, из которого он попадает в катодное тёмное пространство с большой энергией. При отсутствии столкновения энергии электрона оказывается достаточно не только для возбуждения, но и для ионизации молекулы, что приводит к образованию новых ионов и электронов в разрядном промежутке. Электроны из катодного темного пространства проникают в область тлеющего свечения, где рекомбинируют с положительными ионами с выделением энергии.

Из области тлеющего свечения электроны и ионы переходят в фарадеево тёмное пространство за счет процесса диффузии. Концентрация ионов в пространстве невелика, вследствие чего вероятность рекомбинации значительно меньше, чем в области тлеющего свечения.

Реакторы с тлеющим разрядом являются наиболее распространенными, так как для их функционирования требуется неглубокий вакуум (100–500 Па), при котором стабильно формируется разряд, а также возможность получения плазмы в больших объёмах.

Принцип действия ионно-плазменного азотирования в тлеющем разряде заключается в возникновении между деталью, выступающей в роли катода и стенками вакуумной камеры, являющимися анодом. Положительные ионы азота из плазмы тлеющего разряда под действием энергии электростатического поля направляются к обрабатываемой поверхности. При бомбардировке катода

энергия иона расходуется на нагрев. На рисунке 1.9 представлена схема установки для азотирования в тлеющем разряде [22].

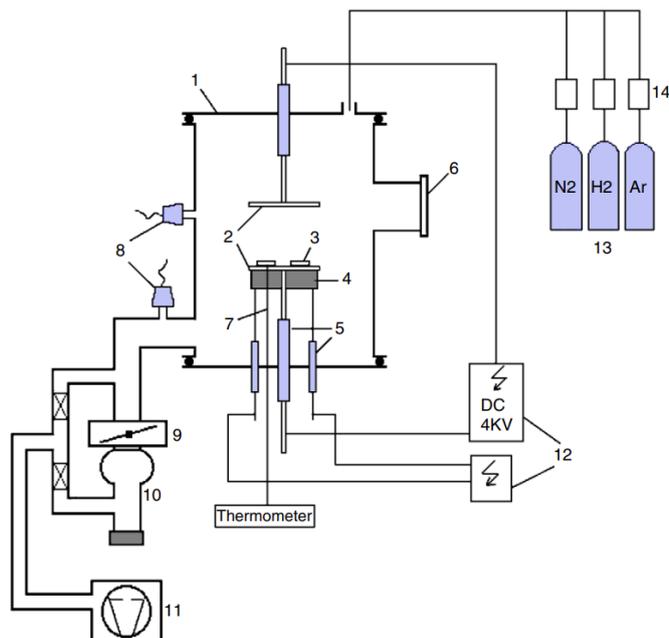


Рисунок 1.9 – Схема для установки азотирования в тлеющем разряде:
1– вакуумная камера; 2– электроды; 3 – образцы; 4 – нагревательный элемент;
5 – питающий ввод; 6 – окно; 7 – термопара; 8 – датчики давления; 9 –
вакуумный предохранительный клапан; 10 – диффузионный насос; 11 –
механический насос; 12 – электроснабжение; 13 – газоснабжение; 14 – счетчик
расхода газа [23]

Данные реакторы имеют следующие недостатки: высокое потребление энергии, сравнительно большая длительность процесса, необходимость введения водорода для связывания кислорода. Отметим, что даже при азотировании в тлеющем разряде трудно получить большую толщину диффузионного слоя из-за высокой длительности процесса.

1.3.3 Влияние параметров ИПА на свойства стали

В настоящем разделе будет рассмотрено влияние параметров ИПА на структуру и свойства сталей, легированных хромом, на примере сталей 40x13 и 12x18н10т. Температура является одним из решающих параметров,

контролирующих структуру и функциональные свойства азотированного слоя стальных деталей. Её влияние на процесс ионно-плазменного азотирования стали 40x13 показан в статье [24]. Нагрев поверхности влияет на следующие свойства подложки при ИПА: фазовый состав, твёрдость и толщина диффузионного слоя, стойкость к коррозии и износу. Азотирование проводилось в газовой смеси 25%N₂+75%H₂ при температурах 350, 450 и 550 °С в течении 15 часов. Выявлено, что при нагреве поверхности увеличивается эффективность диффузии азота вглубь (рост толщины диффузионного слоя), вследствие большей скорости диффузии. Стойкость к коррозии и износу сильно снижаются при температуре 550 °С и более из-за образования нитрида хрома в поверхностном слое стали.

На примере стали 40x13 было также исследовано влияние длительности процесса ИПА на свойства поверхности [25]. Образцы были проазотированы при температуре 400 °С в среде азота в течение различных интервалов времени: 1, 4, 9 и 16 ч. Получено, что при длительности 9 ч и более происходит выпадение преципитатов CrN, это означает, что условия формирования осадка CrN зависят не только от температуры, но и от времени. Влияние длительности ИПА на твёрдость поверхности заметно при времени обработки 4 ч и меньше (в 4,3 раза выше, чем у необработанного материала). При дальнейшем увеличении длительности процесса рост твёрдости и толщины поверхности прекращается, что связано с появлением фазы CrN в приповерхностных слоях образцов.

При ИПА деталь взаимодействует с плазмой газового разряда, основным и неизменным компонентом которой является азот. В камере может находиться только азот, однако в подавляющем большинстве случаев используется смесь азота и водорода. При добавлении к азоту водорода и аргона возможно добиться увеличения устойчивости процесса азотирования.

Влияние добавки водорода на процесс ИПА стали 40x13 исследовали в статье [26]. Азотирование проходило в газовой смеси N₂ и в смеси N₂+H₂ при температуре 400 °С в течение 2 часов. Добавка водорода способствует увеличению скорости диффузии азота вглубь образца, за счёт чего глубина

диффузионного слоя также увеличивается. Добавление водорода в рабочую смесь приводит к значительному росту твёрдости поверхности образца. Присутствие водорода в плазме способствует диффузии азота, действующего как активирующего и дезоксилирующего компонента плазмы.

Известно, что добавление инертных газов в состав рабочей смеси приводит к увеличению эффективности азотирования [27]. В присутствии инертного газа доля электронов с большой энергией увеличивается, что приводит к лучшей диссоциации азота.

Роль кислорода при ИПА достаточно предсказуема. При увеличении парциального давления кислорода уменьшается толщина азотированного слоя, что связано с формированием барьера в виде оксидной пленки на поверхности образца при азотировании. Добавим, что увеличение концентрации кислорода вызывает перемещение атомов хрома из объёма детали на поверхность с последующим формированием оксида хрома и вытеснением остальных элементов, что связано с более низким значением свободной энергии Гиббса для системы Cr-O.

2. Экспериментальные методы и оборудование

В данном разделе рассматриваются методы и оборудование, используемое в исследовании.

2.1 Вакуумная ионно-плазменная установка

В работе была использована вакуумная ионно-плазменная установка, разработанная в научно-образовательном центре Б.П. Вейнберга Томского политехнического университета.



Рисунок 2.1 – Изображение экспериментальной установки для проведения дуплексной технологии обработки

Экспериментальная установка состоит из вакуумной камеры, оборудованной комплектом магнетронов, ионным источником, планетарным подложкодержателем на 8 образцов, высокочастотным (ВЧ) источником плазмы, системой нагревателей и системой подачи рабочих газов (Ar, O₂, H₂ и N₂). Система откачки установки основана на базе криогенного насоса (NC1), турбомолекулярного насоса (NR1) с использованием безмасляного спирального насоса (NL1) в качестве вспомогательного насоса.

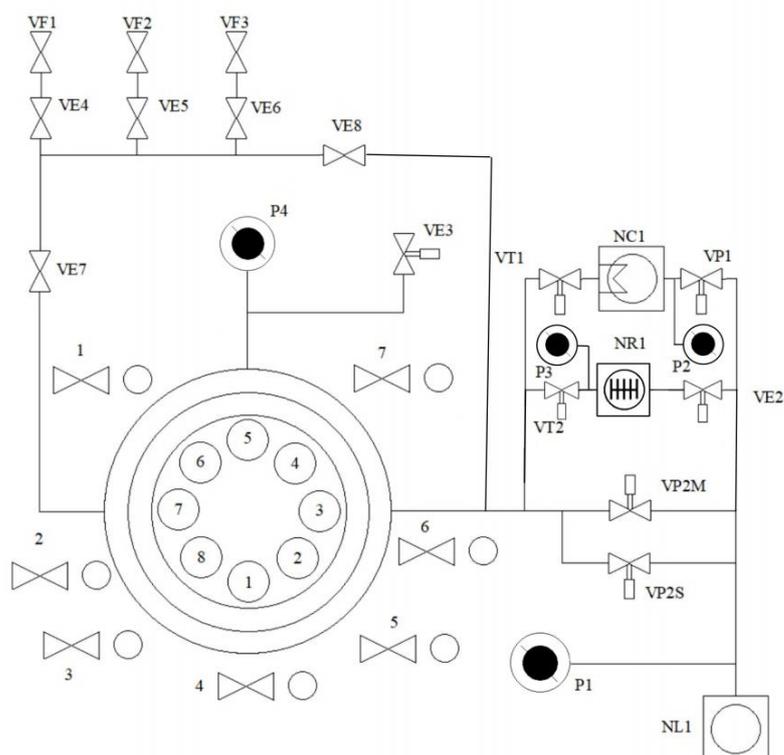


Рисунок 2.2 – Схема экспериментальной установки: NL1 – спиральный насос; NR1– турбомолекулярный насос; NC1– криогенный насос; VP2S, VP2M, VE2, VP1 – вакуумные клапаны; VT2, VT1 – вакуумные затворы, P1, P2, P3, P4 – датчики давления, VE3 – клапан напуска атмосферы

Для корректного запуска установки и её работы требуется привести порядок получения высокого вакуума.

1. Включить спиральный насос NL1 и открыть клапан с меньшим сечением VP2S. Откачку производить до давления 10^4 Па, фиксируемое датчиком P4.
2. Открыть клапан VP2M. Откачку производить до давления запуска турбомолекулярного насоса – 50 Па, фиксируемое датчиком P4.
3. Закрыть клапаны VP2S и VP2M.
4. Открыть клапан VE2, выполнить откачку из турбомолекулярного насоса до давления 50 Па (датчик P3), включить турбомолекулярный насос NR1 и подать охлаждение на него.

5. Если разница давления (P4-P3) меньше 100 Па, то открыть высоковакуумный затвор VT2, производить откачку до необходимого давления, фиксируемого датчиком P4.

Установка оборудована двумя высоковакуумными насосами – турбомолекулярным NR1 и криогенным NC1, что позволяет сократить время откачки высокого вакуума. Поэтому при достижении давления в камере менее 10^{-1} Па возможно параллельное включение и откачка вакуума с помощью криогенного насоса. Для этого требуется открыть высоковакуумный затвор VT1, включать и выключать криогенный насос в начале каждого цикла откачки не требуется, так как он всегда находится в режиме ожидания.

Порядок для перезагрузки образцов следующий.

1. Закрыть высоковакуумные затворы VT2 и VT1.
2. Открыть клапан напуска атмосферы VE3.

При завершении технологического цикла и выключении установки требуется следующее.

1. Закрыть затвор VT2.
2. Выключить турбомолекулярный насос NR1.
3. Закрыть клапан VE2.
4. После полной остановки турбомолекулярного насоса выключить спиральный насос NL1.

2.2 Радиочастотный плазменный генератор РПГ-128

Для диссоциации и ионизации рабочего газа в процессе ионно-плазменного азотирования использовался радиочастотный плазменный генератор РПГ-128. В Таблице 1 указаны его основные технические характеристики.

Таблица 2.1 – Технические характеристики РПГ-128

Параметр	Значение
Частота генератора для возбуждения, МГц	13,56

Продолжение таблицы 2.1.

Параметр	Значение
Максимальная подводимая ВЧ мощность, Вт	1500
Минимальная ВЧ мощность, Вт	300
Диапазон рабочих давлений, Па	0,1-10

Диссоциация и ионизация рабочего газа с помощью РПГ-128 происходит при пропускании тока с частотой 13,56 МГц через плоскую катушку индуктивности. Изменение полярности переменного тока порождает высокочастотное магнитное переменное поле, которое является причиной появления индуцированного ВЧ электромагнитного поля. Свободные электроны под действием электромагнитного поля осциллируют, передавая импульс атомам рабочего газа, возбуждая и ионизируя их.

2.3 Методика пробоподготовки образцов

Для ионно-плазменной обработки изделий одним из важных параметров считается морфология поверхности, которая может оказывать существенное влияние на адгезию осаждаемых покрытий, их сплошность, равномерность, микроструктуру, величину микронапряжений. Поэтому важно выполнять пробоподготовку поверхности изделий, используя механические методы. Для такой задачи широко востребованы полировально-шлифовальные машины, они обычно используются для обработки образцов из сталей, сплавов и других материалов.

В работе использована полировально-шлифовальная машина MP-1B GRINDER POLISHER. Её внешний вид показан на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Полировально-шлифовальная машина MP-1B GRINDER
POLISHER

Чтобы добиться минимальной шероховатости поверхности стали и исключить влияние морфологии на адгезию осаждаемых покрытий проведена следующая технология пробоподготовки образцов.

1. Механическая шлифовка поверхности изделий с равномерным уменьшением размера зерна (P400, P600, P1200, P2400, P4000, где P – зернистость).
2. Полировка поверхности изделий с использованием шерстяного сукна и алмазной суспензии с размерами абразива 3 и 1 мкм.
3. Очистка и обезжиривание образцов. Образцы помещались в 3% моющий раствор флаттера и кипятились в нем 6 мин, далее проводилась их промывка под проточной водой и кипячение в изопропиловом спирте в течение 3 мин последующей сушкой в его парах до полного испарения.

2.4 Изучение кристаллической структуры

Рентгеновское излучение используется для изучения фазового состава и кристаллической структуры вещества. Получение данных о фазовом составе твёрдого тела позволяет определить его возможные свойства. Изучение фазового состава и структуры веществ осуществляется с помощью рентгенофазового и рентгеноструктурного анализа, соответственно. В основе данных методов лежит явление дифракции, поэтому также метод носит

название рентгенодифракционного анализа. Дифракция рентгеновского излучения в кристаллических веществах происходит из модели Брэгга (рисунок 2.4).

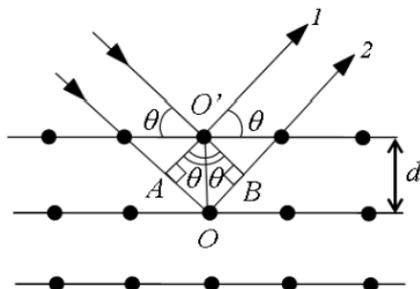


Рисунок 2.4 – Отражение лучей в кристалле по Брэггу [28]

Условие дифракции выражается в формуле Вульфа-Брэгга:

$$2d \sin \theta = n\lambda, \quad (2.1)$$

где d – межплоскостное расстояние;

θ – угол между пучком рентгеновских лучей и плоскостью образца;

λ – длина волны рентгеновского излучения;

n – целое число (порядок дифракции).

Таким образом, явление дифракции возникает лишь на некоторых углах, определяемых условием Брэгга-Вульфа.

При взаимодействии рентгеновского излучения с кристаллическими веществами образуется совокупность вторичного излучения: дифрагированное, флуоресцентное, просвечивающее, тепловое, фотоэлектронное и др. В методе рентгенодифракционного анализа используется только дифрагированное излучение.

Главными компонентами дифрактометра являются рентгеновская трубка и детектор. Они размещаются на подвижном устройстве, называемом гониометром. Это система точной установки и отслеживания угла излучения по отношению к поверхности образца. Одно плечо гониометра задает угол облучения образца рентгеновской трубкой, другое определяет угол брэгговского отражения излучения от образца. Детектор при изменении угла падения пучка регистрирует интенсивность рентгеновского излучения.

В данном исследовании использовался рентгеновский дифрактометр XRD-7000S. Фото дифрактометра представлено на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – Рентгеновский дифрактометр XRD-7000S [29]

Основными параметрами съёмки на дифрактометре являются:

- вещество анода и фильтра K_{β} -излучения;
- величина ускоряющего напряжения и ток электронов;
- тип детектора;
- используемая шкала скорости счета импульсов;
- скорость движения детектора;
- шаг сканирования.

В работе использовалась рентгеновская трубка из меди. Излучение K_{α} . Предельно допустимое ускоряющее напряжение составило 40 кВ, электронный ток 30 мА, диапазон сканирования от 10 до 90°, скорость сканирования дифрактометра 10 °/мин.

2.5 Определение морфологии поверхности

В ходе ионно-плазменного азотирования, вследствие бомбардировки поверхности заряженными ионами происходит значительное изменение её рельефа. Шероховатость поверхности после дуплексной технологии обработки поверхности исследовалась с помощью трехмерного бесконтактного профилометра Micro Measure 3D Station (рисунок 2.6).



Рисунок 2.6 – Прибор Micro Measure 3D Station [30]

Шероховатость поверхности вычисляется из профиля, зарегистрированного на отрезке определённой длины. Профиль поверхности определяют освещая её импульсным световым пучком с последующим вычитанием двух разных отражений, исходящих от поверхности. Размер светового пятна небольшой (несколько мм), что подходит для измерения шероховатости поверхности. После многократного перемещения датчика по поверхности исследуемого образца, формируется трёхмерное изображение поверхности. Далее производится анализ полученных профилей.

2.6 Анализ микроструктуры поперечного сечения

Для исследования микроструктуры поперечного сечения использовался оптический микроскоп Axiovert 200MAT (рисунок 2.7). Для получения изображения поперечного сечения образцы разрезались методом гидроабразивной резки, помещались в алюминиевые оправки и заливались в быстросохнущую двухкомпонентную смолу на основе метилметакрилата. После полного застывания смолы происходила шлифовка и полировка поверхности шлифа.



Рисунок 2.7 – Общий вид Микроскопа Axiovert 200MAT [31]

Подготовленный шлиф помещают перпендикулярно оптической оси микроскопа. Шлиф освещается проходящим через объектив параллельным оптической оси пучком света, который формируется посредством осветительной системы. В осветительную систему входят источник света (лампа), коллекторная линза, апертурная и полевая диафрагмы, вспомогательные литы и полупрозрачная пластина.

Световые лучи, отраженные от ровных участков поверхности шлифа, попадают в объектив. Лучи, отраженные от микронеровностей, в объектив не попадают. Конечное изображение формируется окуляром. Ровные участки шлифа, перпендикулярные оптической оси микроскопа, на конечном изображении оказываются светлыми, а участки, наклоненные к оси, - темными. Благодаря этому выявляются границы зерна, частицы второй фазы, поры, другие элементы структуры материала.

2.7 Методика измерения твёрдости

В работе было задействовано две техники измерения твёрдости ввиду необходимости анализа свойств и покрытия, и материала подложки.

2.7.1 Твёрдость покрытия по глубине

Твёрдость покрытия по глубине проникновения исследовалась методом наноиндентирования пирамидой Берковича на нанотвердомере ННТ² (CSM Instruments) (рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 – Изображение нанотвердомера ННТ²

Модуль наноиндентирования опускается на поверхность образца, пока опорное кольцо не коснется его поверхности. Далее происходит опускание индентора с определенной скоростью и его нагружения при помощи постоянного магнита и соленоида. Перемещение индентора контролируется электромагнитом. Ёмкостной датчик, расположенный около наконечника индентора, контролирует и измеряет вертикальное перемещение [32].

На рисунке 2.9 представлена схема для наноиндентирования поверхности изделий.

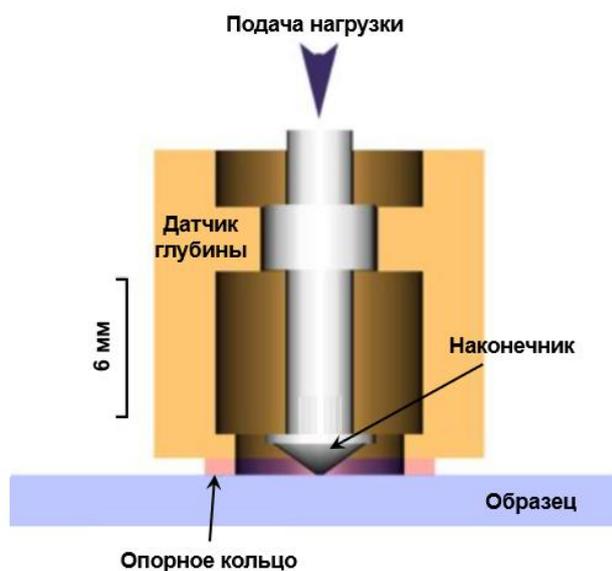


Рисунок 2.9 – Схема системы для наноиндентирования

Для анализа нанотвёрдости в работе использовались нагрузки индентора 10, 30, 50, 100, 150, 200 и 250 мН. Для надёжного представления о распределении твёрдости покрытия по образцу количество измерений составило не менее 3 раз для каждого условия испытаний.

2.7.2 Твёрдость стали по глубине

Анализ микротвёрдости стали по глубине азотированного слоя проводили с помощью твердомера Виккерса КВ10, изображенного на рисунке 2.10.

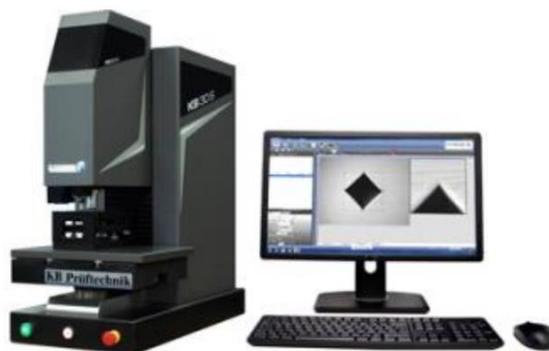


Рисунок 2.10 – Изображение твердомера Виккерса KB10 [33]

Испытание твёрдости по Виккерсу проводят путем вдавливания в испытуемый образец четырехгранной алмазной пирамиды с углом при вершине 136° .

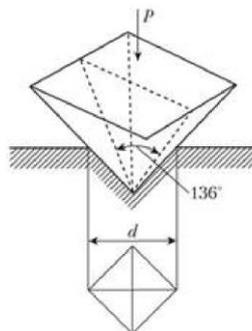


Рисунок 2.11 – Схема измерения твёрдости по методу Виккерса [33]

Твёрдость по Виккерсу определяют отношением нагрузки P к площади поверхности полученного отпечатка F . Отпечаток получается в виде квадрата. С помощью микроскопа, являющегося составной частью прибора, измеряют его диагонали и определяют их среднеарифметическое значение. Величина твёрдости характеризуется символом HV и вычисляется по формуле 2.2:

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = \frac{P \times 1,854}{d^2}, \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2} \quad (2.2)$$

где P – нагрузка, Н;

α – угол между противоположными гранями пирамиды алмазного наконечника, $\alpha = 136^\circ$;

d – среднее арифметическое длины обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мм.

Для анализа твёрдости в работе использовалась нагрузка индентора 0,02Н. Индентация производилась на глубине от ~ 7 до 70 мкм с шагом 7-10 мкм. Для надёжного представления о распределении твёрдости по образцу количество измерений составило не менее 3 раз для каждого условия испытаний.

2.8 Трибологические испытания

Для проведения трибологического испытания был использован высокотемпературный трибометр PC-Operated High Temperature Tribometer ТНТ-S-АХ0000 (CSEM, Швейцария). Внешний вид прибора показан на рисунке 2.12.



Рисунок 2.12 – Трибометр PC-Operated High Temperature Tribometer ТНТ-S-АХ0000 [34]

Исследуемый образец закрепляется на вращающемся диске. Износ исследуемого образца определяется путем измерения трека образованного в результате действия неподвижного индентора на вращающийся образец.

Схема испытания на износостойкость покрытия показана на рисунке 2.13.

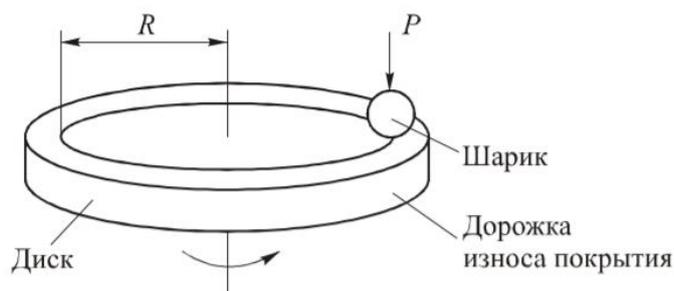


Рисунок 2.13 – Схема испытания износостойкости покрытий

Компьютерная программа InstrumX регистрирует следующие параметры:

- радиус трека R , по которому движется шарик (мм);
- линейная скорость шарика (см/с);
- нагрузка P , прикладываемая к шарiku (Н);
- условие завершения (количество кругов, при достижении которого шарик останавливается);
- частота прохода одного круга (Гц).

В работе для исследования износостойкости образцов была выбрана нагрузка на индентор 5 Н, температура образца 25 °С, радиус шара 2,51 мм, скорость движения образца 5 см/с.

2.9 Изучение адгезии покрытий

Для исследования адгезионных свойств и износостойкости покрытий в работе использовалось устройство Micro-Scratch Tester MST-S-AX-0000 (рисунок 2.14).



Рисунок 2.14 – Изображения устройства для исследования адгезии тонких плёнок Micro-Scratch Tester MST-S-AX-0000 [35]

Технические характеристики прибора представлены в Таблице 2.

Таблица 2.2 – Технические характеристики прибора Micro-Scratch Tester MST-S-AX-000

Параметр	Значение
Диапазон нагрузки, мН	$10 - 30 \cdot 10^3$
Разрешение по нагрузке, мН	0,1
Сила трения, мН	$10 - 30 \cdot 10^3$
Разрешение по силе трения, мН	0,15
Глубина проникновения индентора, мкм	1000
Разрешение по глубине, нм	1,5
Рабочая область стола, мм ²	75x75
Скорость нанесения царапины, мм/мин	0,1–20
Объективы микроскопа	50x, 200x, 1000x

Прибор определяет следующие параметры системы плёнка/основа:

- сила трения;
- сила сцепления;
- сигнал акустической эмиссии;
- глубина вдавливания индентора.

При измерении адгезионной прочности покрытия применяется контролируемое нанесение царапины на образец при помощи алмазного индентора. Индентор проходит по поверхности покрытия при постоянной или изменяемой нагрузке. При определенной критической нагрузке покрытие начинает разрушаться. Критическая нагрузка определяется при помощи датчиков акустической эмиссии, силы трения, глубины проникновения, силы нагружения индентора и оптической микроскопии. В устройстве предусмотрена компьютерная обработка данных. Вся информация во время теста отображается в режиме реального времени.

В работе при исследовании адгезионной прочности использовался алмазный индентор с радиусом 100 мкм, нагрузка изменялась равномерно от 0,01 до 30 Н, длина царапины 5 мм.

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Введение

Выполнение раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» несет в себе цель выполнить комплексное описание и анализ финансовоэкономических аспектов проекта. Необходимо оценить полные денежные затраты на проект, а также дать приближенную экономическую оценку результатов его внедрения.

Цель работы – получение данных о влиянии длительности ионно-плазменного азотирования (ИПА) на структурные и функциональные свойства стали после дуплексной технологии обработки.

4.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Настоящая выпускная квалификационная работа посвящена дуплексной технологии модифицирования поверхности сталей, включающей в себя процессы ионно-плазменного азотирования (ИПА) в высокочастотном (ВЧ) разряде и магнетронного реактивного осаждения.

Продуктом исследования является модифицированное стальное изделие, поверхность которого прошла обработку методами ИПА и магнетронного реактивного осаждения покрытия CrAlN. Покрытия CrAlN применяются для улучшения механических (твердость, ударная вязкость) и функциональных (износостойкость, коррозионная стойкость, жаропрочность, смачиваемость и т.д.) изделий. Технология ИПА, проводимая перед нанесением покрытия необходима для улучшения адгезии между плёнкой и материалом изделия.

Целевым рынком являются области машиностроения, авиастроения и кораблестроения, так как зачастую именно в данных областях необходимо производство изделий с высоким сроком службы. Потребителями выступают коммерческие лица, так как покрытия CrAlN позволяют продлить срок службы изделий, работающих в агрессивных средах.

4.2 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных решений целесообразно проводить при помощи оценочной карты, для этого определим 2-х конкурентов на рынке: технология осаждения покрытий CrAlN с предварительным газовым азотированием (B_1), магнетронное реактивное осаждение покрытий CrAlN (B_2).

Расчет показателей конкурентоспособности проводился по следующей формуле

$$K = \sum_i B_i \cdot V_i \quad (4.1)$$

где B_i – балл i -го показателя;

V_i – вес показателя.

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

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		B_{ϕ}	$B_{\kappa 1}$	$B_{\kappa 2}$	K_{ϕ}	$K_{\kappa 1}$	$K_{\kappa 2}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Производительность	0,25	5	4	4	1,25	1	1
2. Надежность	0,15	5	3	4	0,5	0,3	0,4
3. Простота методики	0,15	3	4	5	0,45	0,6	0,75
4. Адгезионная устойчивость покрытий	0,15	5	3	2	0,75	0,45	0,3
5. Возможность автоматизации	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
Экономические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,05	4	4	5	0,2	0,25	0,25
2. Стоимость технологии	0,06	4	5	5	0,24	0,3	0,3
3. Уровень проникновения на рынок	0,04	3	3	5	0,12	0,12	0,2
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	5	3	2	0,25	0,15	0,1
Итого	1	39	34	37	4,26	3,67	3,8

Согласно вышеприведенному расчету видно, что предлагаемая дулексная технология обработки поверхности изделий имеет более высокий показатель конкурентоспособности (4,26). Это обусловлено следующим рядом

факторов: технология имеет высокую производительность, надёжность и адгезионную устойчивость покрытий.

4.3 SWOT – анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. Результаты исследования приведены в SWOT-анализ (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – SWOT-анализ

	Сильные стороны проекта С1. Высокая производительность технологии. С2. Высокая повторяемость технологии. С2. Высокая адгезия осаждаемых частиц.	Слабые стороны проекта Сл1. Более энергозатратная технология по сравнению с конкурентными. Сл2. Отсутствие недостаточного финансирования проекта. Сл3. Большой срок поставки комплектующих установки.
Возможности: В1. Использование инновационной структуры ТПУ. В2. Повышение стоимости конкурентных разработок.	1.Получение результатов технологии 2.Продвижение НТИ на рынок	1.Поиск дополнительного финансирования в виде грантов 2.Повышение квалификации кадров у потенциальных потребителей 3.Приобретение необходимого оборудования
Угрозы: У1. Отсутствие спроса на НТИ; У2. Уменьшение финансирования исследования У3. Введение дополнительных государственных требований к сертификации.	1. Продвижение технологии с целью создания спроса 2.Сертификация и стандартизация технологии	1. Приобретение необходимого оборудования/использование инновационной инфраструктуры ТПУ 2. Продвижение технологии с целью создания спроса

4.4 Планирование научно-исследовательских работ

4.4.1 Структура работ в рамках научного исследования

Комплекс предполагаемых работ включает в себя следующие задачи:

- определить структуру работ в рамках исследования;
- определить участников каждой работы;
- установить продолжительность работ.

Работа выполнялась студентом (инженер) под руководством научного руководителя (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Список производимых задач и работ и их исполнители

Основные этапы	№	Содержание работ	Должность
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Выбор направления исследований и способа решения задач	Руководитель
	3	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
Теоретические и экспериментальные исследования	4	Составление плана экспериментов	Руководитель, инженер
	5	Подготовка образцов для экспериментальных работ	Инженер
	6	Проведение эксперимента	Руководитель, инженер
	7	Выполнение расчётов	Инженер
Обобщение и оценка результатов	8	Анализ и обработка полученных результатов	Инженер
	9	Обсуждение и оценка эффективности результатов	Руководитель, инженер
Оформление отчёта по НИР	10	Составление пояснительной записки	Инженер
	11	Подготовка к защите работы	Инженер

4.4.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{minі} + 2t_{maxі}}{5} \quad (4.2)$$

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

$t_{minі}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, чел.-дн.;

$t_{maxі}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, чел.-дн.

Среднее значение трудоемкости составляет:

$$t_{ожі} = \frac{3 \cdot 14 + 2 \cdot 35}{5} = 22,4 \text{ чел. – дн.} \quad (4.3)$$

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65%.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i} \quad (4.4)$$

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

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

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Продолжительность одной работы составляет:

$$T_{pi} = \frac{22,4}{2} = 11,1 \text{ раб. дн.} \quad (4.5)$$

4.4.3 Разработка графика проведения научного исследования

Наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{Ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}} \quad (4.6)$$

где T_{Ki} – продолжительность выполнения i -ой работы в календарных днях;

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

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

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} \quad (4.7)$$

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

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

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

Коэффициент календарности составляет:

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 52 - 14} = 1,22 \quad (4.8)$$

Продолжительность выполнения i -ой работы:

$$T_{Ki} = 11,1 \cdot 1,22 = 13,54 = 14 \text{ кал. дн.} \quad (4.9)$$

Календарный план-график проведения НИОКР по теме представлен в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Распределение исполнителей и этапы выполняемых работ

№	Вид работ	Исполнитель	Т _к , кал.дн.	Продолжительность выполнения работ						
				Янв.	Февр.	Март	Апр.	Май		
1	Составление ТЗ	Руководитель	4	▣						
2	Изучение литературы	Инженер	14	▣						
3	Подбор режимов работы	Руководитель	7		▣					
		Инженер	7		▣					
4	Календарное планирование	Руководитель	7		▣					
		Инженер	7		▣					
5	ИПА и осаждение покрытий	Руководитель	15		▣					
		Инженер	15		▣					
6	Проведение испытаний образцов	Инженер	21			▣				
7	Анализ полученных результатов	Руководитель	5				▣			
		Инженер	10				▣			
8	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель	7					▣		
		Инженер	7					▣		
9	Составление пояснительной записки	Инженер	21					▣		
Итого			140							

▣ - обозначение продолжительности выполнения работ руководителя,
▣ - инженера.

В результате выполнения подраздела был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей, а также рассчитано количество дней, в течение которых работал каждый из исполнителей.

4.5 Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета научного исследования учитывается полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

1. материальные затраты НТИ;
2. затраты на специальное оборудование;
3. амортизационные отчисления;
4. основная заработная плата исполнителей;
5. дополнительная заработная плата исполнителей;
6. отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
7. накладные расходы.

4.5.1 Материальные затраты НТИ

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В таблице 4.5 приведены расходы по данной статье.

Таблица 4.5 – Сырье, материалы, комплектующие изделия

Наименование	Марка, размер, мм	Кол-во	Цена на единицу, руб.	Сумма, руб.
Мишень из хрома	90x6	1	30 000	30 000
Мишень из алюминия	90x6	1	7 000	7 000
Баллоу аргона	Ar, 99,9%	1	8 000	8 000
Баллон азота	N ₂ , 99,9%	1	6 000	6 000
Баллон водорода	H ₂ , 99,9%	1	6 000	6 000
Подложки их стали	40x13	6	20	120
Подложки из кремния	-	6	40	240
Всего за материалы				57 360
Транспортно-заготовительные расходы (5%)				2868
Итого по статье				60 228

4.5.2 Амортизационные отчисления

При выполнении исследования дополнительное оборудование для проведения исследований не было приобретено. Все использованное оборудование являлось собственностью отделения экспериментальной физики НИИ ТПУ. Необходимо рассчитать амортизационные отчисления для использованного оборудования.

Расчет амортизации проводился следующим образом

$$H_a = \frac{1}{n} \quad (4.10)$$

где n – срок полезного использования (СПИ) в количестве лет.

Ежемесячные амортизационные отчисления:

$$A_M = \frac{H_a \cdot И}{12} \quad (4.11)$$

где $И$ – первоначальная стоимость оборудования (ПСО), тыс.руб.

Расчет амортизационных отчислений приведен в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Амортизационные отчисления

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	СПИ	ПСО, тыс.руб	Норма амортизации	Ежемесячные отчисления, тыс. руб
1	Вакуумная установка	1	10	8 000	0,10	66,7
2	Генератор плазмы РПГ-128	1	10	1 000	0,10	8,3
3	Сканирующий электронный микроскоп	1	10	2 000	0,10	16,7
4	Профилометр (Micro Measure 3D Station)	1	12	500	0,08	3,5
5	Твердомер КВ-10	1	20	2 000	0,05	8,8
6	Трибометр	1	20	1 000	0,05	4,2
7	Ноутбук	1	5	30	0,2	0,5
Итого по статье						108,7

Таким образом, амортизационные затраты на специальное оборудование в ходе научного исследования в сумме на специальное оборудование составили 108,7 тыс. рублей.

4.5.3 Основная заработная плата исполнителей

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме и дополнительная заработная плата научно-производственного персонала.

Баланс рабочего времени представлен в таблице 4.7.

Таблица 4.7 -Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	265
Календарное число нерабочих дней		
- выходные дни	52	82
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	45	52
- невыходы по болезни	-	-
Действительный годовой фонд рабочего времени	254	217

Основная заработная плата $Z_{осн}$ одного работника рассчитывается по следующей формуле

$$Z_{осн} = Z_{дн} + T_{раб} \quad (4.12)$$

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

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} \quad (4.13)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года (при отпуске в 24 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя);

F_{∂} – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_M = Z_{TC} \cdot (1 + k_{np} + k_d) \cdot k_p \quad (4.14)$$

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

k_{np} – премиальный коэффициент, равный 0,3;

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5;

k_p – районный коэффициент, равный 1,3

Расчет основной заработной платы представлен в таблице 4.8

Руководителем в данном случае выступает Сиделёв Д.В. доцент, к.т.н, оклад которого составляет 37700, оклад инженера примем равным 13900. Премииальные коэффициент и коэффициент доплат учитывать не будем.

Таблица 4.8 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	Z_{mc}	k_{np}	k_d	k_p	Z_M , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	37700	-	-	1,3	49010	2007	45	90302
Инженер	13900	-	-	1,3	18070	866	102	88335
Итого по статье								178637

4.5.4 Дополнительная заработная плата исполнителей

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10 – 15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы. Таким образом, сумма основной заработной платы участников проекта и дополнительной будет составлять статью затрат расходов на зарплату:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} \quad (4.15)$$

Дополнительная заработная плата:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} \quad (4.16)$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (равен 1,15).

Таблица 4.9 – Дополнительная заработная плата исполнителей НТИ

Исполнитель	Руководитель	Инженер
Основная заработная плата, руб	90 302	88 335
Дополнительная заработная плата, руб	13 545	13 250
Суммарная дополнительная зарплата, руб	26 795	
Суммарная зарплата, руб	103 847	101 585
Итого по статье, руб	205 432	

4.5.5 Отчисления во внебюджетные фонды

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется по формуле:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) \quad (4.17)$$

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

Отчисления на социальные нужды (30% от статьи заработной платы) составили 61 630 руб.

4.5.6 Накладные расходы

Накладные расходы – это затраты на управление и хозяйственное обслуживание и расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. Их величина определяется по формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (C_{\text{осн}} + C_{\text{доп}} + C_{\text{внеб}}) \quad (4.18)$$

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

Величину коэффициента накладных расходов возьмём в размере 16%.

$$C_{\text{накл}} = 0,16 \cdot (178 637 + 26 795 + 61 630) = 71 312 \text{ руб.} \quad (4.19)$$

4.5.7 Бюджет затрат НТИ

Расчет бюджета затрат НТИ приведен в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
Материальные затраты	60 228
Амортизационные отчисления	108 700
Затраты на основную заработную плату	178 637
Затраты на дополнительную заработную плату	26 795
Страховые взносы	61 630
Накладные расходы	71 312
Бюджет затрат НИИ	507 302

4.6 Определение ресурсной эффективности исследования

Эффективность научного ресурсосберегающего проекта включает в себя социальную эффективность, экономическую и бюджетную эффективность. Показатели общественной эффективности учитывают социально-экономические последствия осуществления инвестиционного проекта как для общества в целом, в том числе непосредственные результаты и затраты проекта, так и затраты, и результаты в смежных секторах экономики, экологические, социальные и иные внеэкономические эффекты.

Показатели экономической эффективности проекта учитывают финансовые последствия его осуществления для предприятия, реализующего данный проект. В этом случае показатели эффективности проекта в целом характеризуют с экономической точки зрения технические, технологические и организационные проектные решения. Бюджетная эффективность характеризуется участием государства в проекте с точки зрения расходов и доходов бюджетов всех уровней.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} \quad (4.20)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп}}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

В качестве вариантов исполнения были выбраны ближайšie аналоги процесса дуплексной технологии обработки поверхности стали с предварительным ИПА в ВЧ разряде ($\Phi_{p1}=468126$), технология осаждения покрытий CrAlN с предварительным газовым азотированием ($\Phi_{p2}=340500$) и магнетронное реактивное осаждение покрытий CrAlN ($\Phi_{p3}=260000$).

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп}1} = \frac{507302}{507302} = 1 \quad (4.21)$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп}2} = \frac{540500}{507302} = 1,07 \quad (4.22)$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп}3} = \frac{492\,000}{507302} = 0,97 \quad (4.23)$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разы.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i \quad (4.24)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Далее в таблице 4.11 представлена сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта, где аналог 1 – технология осаждения покрытий

CrAlN с предварительным газовым азотированием, аналог 2 – магнетронное реактивное осаждение покрытий CrAlN.

Таблица 4.11 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
Критерии				
1.Адгезионная прочность покрытий	0,25	5	4	2
2.Экологичность	0,15	5	3	5
3.Надежность	0,2	5	4	4
4.Безопасность	0,3	5	4	5
5.Простота эксплуатации	0,1	4	3	5
Итого	1	24	18	21

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{p1} = 0,25 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5 + 0,3 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 = 4,90 \quad (4.25)$$

$$I_{p2} = 0,25 \cdot 4 + 0,15 \cdot 3 + 0,2 \cdot 4 + 0,3 \cdot 4 + 0,1 \cdot 3 = 3,75 \quad (4.26)$$

$$I_{p3} = 0,25 \cdot 2 + 0,15 \cdot 5 + 0,2 \cdot 4 + 0,3 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 = 3,95 \quad (4.27)$$

Интегральный показатель эффективности разработки ($I_{фин}^p$) и аналога ($I_{фин}^a$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{фин}^p = \frac{I_m^p}{I_\phi^p} = \frac{4,9}{1} = 4,9 \quad (4.28)$$

$$I_{фин}^{a1} = \frac{I_m^{a1}}{I_\phi^p} = \frac{3,75}{1,07} = 3,5 \quad (4.29)$$

$$I_{фин}^{a2} = \frac{I_m^p}{I_\phi^p} = \frac{3,95}{0,97} = 4,07 \quad (4.30)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{фин}}^p}{I_{\text{фин}}^{ai}} \quad (4.31)$$

где $\mathcal{E}_{\text{ср}}$ – сравнительная эффективность проекта;

$I_{\text{фин}}^p$ – интегральный показатель разработки;

$I_{\text{фин}}^{ai}$ – интегральный технико-экономический показатель аналога.

В таблице 4.12 представлена сравнительная эффективность разработки, где аналог 1 – технология осаждения покрытий CrAlN с предварительным газовым азотированием, а аналог 2 – магнетронное реактивное осаждение покрытий CrAlN.

Таблица 4.12 – Сравнительная эффективность разработки

№	Показатели	Разработка	Аналог 1	Аналог 2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	1,07	0,97
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,9	3,75	3,95
3	Интегральный показатель эффективности	4,9	3,5	4,07
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	1,4	1,2

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет судить о приемлемости существующего варианта решения, поставленного в данной технической задаче с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

1. В ходе выполнения раздела «Финансовый менеджмент» был выполнен анализ конкурентоспособности. Данный анализ подтвердил конкурентоспособность применения дуплексной технологии обработки поверхности изделий с предварительным ИПА с ВЧ разряде, в связи с более высокими показателями механических и функциональных характеристик поверхности изделий.

2. Проведен 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 45 дней, а для инженера 102 дней. На основе временных показателей по каждой из произведенных работ был построен календарный план-график, по которому можно увидеть, что самая продолжительная по времени работа – измерение полученных покрытий и составление пояснительной записки.

4. Составлен бюджет проектирования, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, которые составляют 507 302 руб;

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.

5. Социальная ответственность

Введение

Настоящая выпускная квалификационная работа посвящена дуплексной технологии модифицирования поверхности изделий, включающей в себя процессы ионно-плазменного азотирования (ИПА) в высокочастотном (ВЧ) разряде и магнетронного реактивного осаждения. Процессы ИПА и магнетронного осаждения относятся к процессам химико-термической обработки поверхности изделий, и предполагают работу с высоким напряжением и различными газами (аргон, азот и водород).

Научно-технической базой для проведения исследования стала лаборатория 101 научно-образовательного центра Б.П. Вейнберга. При выполнении настоящей бакалаврской работы были использованы: экспериментальная установка для проведения процессов ИПА и магнетронного реактивного осаждения, ЭВМ, газовые баллоны со сжатым аргоном, азотом и водородом. Приведем анализ вредных и опасных производственных факторов, а также комплекс защитных мероприятий.

5.1 Правовые вопросы обеспечения безопасности

5.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства

Знание и строгое соблюдение правил техники безопасности являются обязательными для всего персонала. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа, и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом [41].

Квалификационной комиссией проводится проверка знаний правил техники безопасности после обучения на рабочем месте. Проверяемому сотруднику, присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается удостоверение.

Сотрудник, допущенный к работе на лабораторной экспериментальной ионно-плазменной установке, должен быть не моложе 18 лет, не иметь медицинских противопоказаний, пройти вводный инструктаж и инструктаж по безопасности труда на рабочем месте. К самостоятельной работе может быть допущен работник после специального обучения и проверки знаний правил электробезопасности, приобретенных навыков и безопасных способов выполнения работы и имеющий не менее II группы по электробезопасности.

Повторную проверку знаний норм и правил электробезопасности, правил безопасной работы с химическими веществами необходимо проводить с работниками не реже 1 раза в 12 месяцев, повторный инструктаж на рабочем месте – не реже 1 раза в 3 месяца.

Проведение всех видов инструктажа должно оформляться в журнале регистрации инструктажа установленного образца, с обязательными подписями получившего и проводившего инструктаж, с указанием даты проведения инструктажа, наименования и номеров инструкции на виды работ, по которым проводится инструктаж.

При введении в эксплуатацию нового оборудования сотрудники, которые будут работать на нем, должны пройти внеплановый инструктаж по правилам эксплуатации и безопасной работе на данном оборудовании.

5.1.2 Организация рабочей зоны исследователя

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ, должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 5.1.

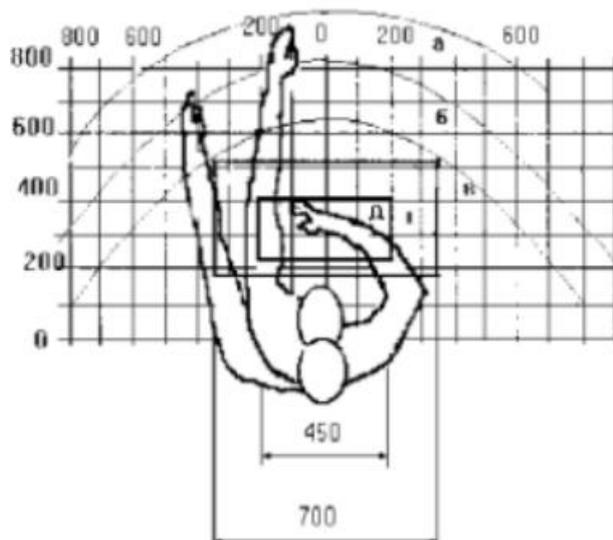


Рисунок 5.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости: а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке – зона легкой досягаемости ладони; в – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук:

- дисплей размещается в зоне а (в центре);
- клавиатура – в зонах в и д;
- системный блок размещается в зоне б (слева);
- принтер находится в зоне а (справа);
- документация – в зоне легкой досягаемости ладони;
- слева в зоне в(слева) размещается литература и документация, необходимая при работе;
- в выдвижных ящиках стола размещается литература, которая не используется постоянно.

Для проектирования письменного стола должны быть учтены следующие требования:

- высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680-800 мм;

- высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм;
- рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм;
- пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно–поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420-550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем. Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45 градусов к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30 градусов. Кроме того, должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране [42].

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

5.2 Производственная безопасность

При работе на экспериментальной установке, предназначенной для процессов ионно-плазменного азотирования и магнетронного осаждения, имеют место опасные и вредные производственные факторы [43]. Возможные опасные и вредные факторы при работе с экспериментальной установкой и нормативные документы, их регулирующие сведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Возможные опасные и вредные факторы при работе с экспериментальной ионно-плазменной установкой

Факторы		Этапы работ			Нормативные документы
Вредные	Опасные	Разработка	Изготовление	Испытание	
Повышенный уровень шума		-	+	-	ГОСТ 12.1.029-80 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства и методы защиты от шума. Классификация» [44]
Отсутствие естественного света		+	+	+	СанПин 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение» [45]
	Электрический ток	-	+	-	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность» [46]
Отклонение показателей микроклимата		+	+	+	СанПин 2.2.4.548-96. «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» [47]
	Химическое воздействие на организм	-	+	+	Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004-85 ССБТ. Пожарная безопасность [48]

5.2.1 Опасные и вредные производственные факторы

1. Повышенный уровень шума

Основными источниками шума при работе на ионно-плазменной установке являются вытяжка, форвакуумный спиральный и высоковакуумные турбомолекулярный и криогенный насосы. Вытяжка включается при работе с сильными кислотами и спиртами. Форвакуумный спиральный насос работает во время создания и поддержания вакуума в камере, шум от которого не более

58 дБ [49], что соответствует допустимому уровню шума в лабораториях для проведения научных экспериментов, который не должен превышать 60 дБ [44]. Шум от турбомолекулярного и криогенного насосов также не превышает 50 дБ. Поэтому вклад в изменении уровня шума форвакуумные и высоковакуумные насосы не вносят.

Шум является очень важным фактором, влияющим на организм человека. Повышенный уровень шума вызывает проблемы со здоровьем, например, тугоухость, глухоту, оказывает неблагоприятное воздействие на психику и центральную нервную систему человека. В результате его воздействия у человека появляются симптомы переутомления и истощения нервной системы. Под влиянием шума учащаются пульс и дыхание, повышается расход энергии, наблюдаются подавленное настроение, понижение внимания, задерживаются интеллектуальные процессы, повышается нервная возбудимость. В целом, можно заключить, что шум снижает работоспособность и производительность труда персонала.

Рекомендуется использовать следующие средства коллективной защиты: акустические экраны, перегородки, объемные поглотители звука, виброизолирующие опоры; средства индивидуальной защиты: специальные наушники, вкладыши в ушную раковину, противозумные каски. В качестве материалов для шумозащитных экранов применяют минеральную вату, композитные материалы, пластмассы, поликарбонаты, древесина, металлы, кирпичную кладку, бетон.

2. Освещение

Согласно [45] в лаборатории, где происходит периодическое наблюдение за ходом производственного процесса при постоянном нахождении людей в помещении освещенность при системе общего освещения должна быть 150 Лк.

Правильно спроектированное и выполненное освещение обеспечивает высокий уровень работоспособности, оказывает положительное

психологическое действие на человека и способствует повышению производительности труда. На рабочей поверхности должны отсутствовать резкие тени, которые создают неравномерное распределение поверхностей с различной яркостью в поле зрения, искажает размеры и формы объектов различия, в результате повышается утомляемость и снижается производительность труда.

Для защиты от слепящей яркости видимого излучения (факел плазмы в камере с катализатором) применяют защитные очки, щитки, шлемы. Очки на должны ограничивать поле зрения, должны быть легкими, не раздражать кожу, хорошо прилегать к лицу и не покрываться влагой.

При анализе структурных и функциональных свойств материалов использовался персональный компьютер. Освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300 – 500 лк. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана должна быть не более 300 лк.

2.1. Расчет искусственного освещения

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен. Производственное помещение, где располагается экспериментальная ионно-плазменная установка, имеет следующие параметры (таблица 5.2).

Таблица 5.2 – Параметры помещения

Длина (A), м	Ширина (B), м	Высота (H), м	Высота рабочей поверхности над полом (h_{pn}), м
14,5	9,5	3,7	0,8

Рассчитаем площадь помещения S :

$$S = A \cdot B = 14,5 \cdot 9,5 = 137,75 \text{ м}^2 \quad (5.1)$$

Выбираем светильник ALS.OPL 418 HF ES1 [50], световой поток которой равен $\Phi_{лд} = 1350$ Лм. Светильник имеет 4 лампы мощностью 18 Вт, длина светильника равна 640 мм, ширина – 640 мм.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина λ , которая для люминесцентных светильников с защитной решёткой лежит в диапазоне 1,1–1,3. Принимаем $\lambda=1,1$, расстояние светильников от перекрытия $h_c = 0,3$ м.

Определяем расчетную высоту светильника над рабочей поверхностью по формуле:

$$h = H - h_c - h_{\text{рп}} = 3,7 - 0,3 - 0,8 = 2,6 \text{ м} \quad (5.2)$$

Расстояние между соседними светильниками или рядами светильников L рассчитываем по формуле:

$$L = \lambda \cdot h = 1,1 \cdot 2,6 = 2,86 \text{ м} \quad (5.3)$$

Расстояние от крайнего ряда светильников до стены:

$$L = L/3 = 0,953 \text{ м} \quad (5.4)$$

Определяем индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{14,5 \cdot 9,5}{2,6 \cdot (14,5 + 9,5)} = 2 \quad (5.5)$$

Зная коэффициент отражения свежепобеленных стен с окнами, без штор $\rho_c=50\%$, свежепобеленного потолка $\rho_{\text{п}}=70\%$ и пола – 20 %, коэффициент использования светильника равен 0,51. Коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, для помещений с малым выделением пыли K_3 равен =1,5. Коэффициент неравномерности для люминесцентных ламп $Z = 1,1$.

Тогда количество светильников, необходимых для установки в лаборатории 101 НОЦ им. Вейнберга равно

$$N = \frac{E \cdot S \cdot K_3}{\eta \cdot n \cdot \Phi_{\text{л}}} = \frac{200 \cdot 138 \cdot 1,5}{0,51 \cdot 4 \cdot 1350} = 15,032 = 16 \quad (5.6)$$

где E – требуемая горизонтальная освещенность, лк;

S – площадь помещения, м²;

K_3 – коэффициент запаса;

U – коэффициент использования;

$\Phi_{\text{лд}}$ – световой поток одной лампы, лм;

η – коэффициент использования светильника.

Световой поток группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{E \cdot A \cdot B \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot n \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 14,5 \cdot 9,5 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{16 \cdot 4 \cdot 0,51} = 1393 \text{ лм} \quad (5.7)$$

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi}{\Phi_{\text{лд}}} \leq 20\% = -10\% \leq \frac{1350 - 1393}{1350} \leq 20\% \quad (5.8)$$

Таким образом: $-10\% \leq -3,19\% \leq 20\%$, необходимый световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона.

Размещаем светильники в 2 ряда по 6 штук. На рисунке 5.2 изображен план размещения светильников с люминесцентными лампами в лаборатории 101 НОЦ Б.П. Вейнберга.

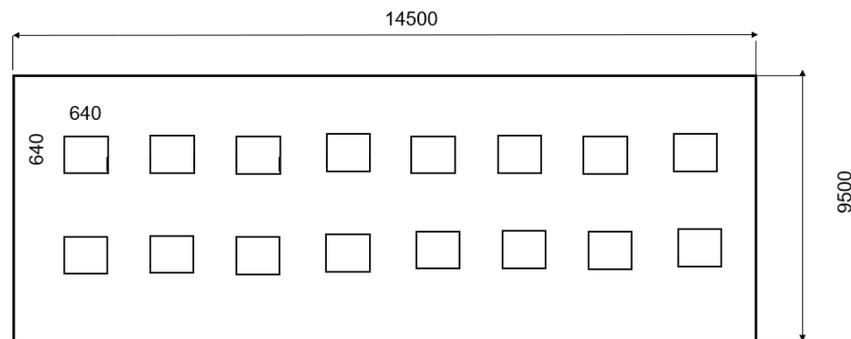


Рисунок 5.2 – План размещения светильников в лаборатории 101 НОЦ Б.П. Вейнберга

3. Электробезопасность

Неисправность проводки установки может стать причиной поражения электрическим током. Прохождение тока может вызывать у человека раздражение и повреждение различных органов. Пороговый не отпускающий ток составляет 6–16 мА. Защита от воздействия электрического тока осуществляется путем проведения организационных, инженерно-технических и лечебно-профилактических мероприятий [51]. Источником опасности в

помещении лаборатории 101 является ионно-плазменная установка. Так как поражение электрическим током может произойти при прикосновении к токоведущим частям, находящимся под напряжением, на которых остался заряд или появилось напряжение.

Электробезопасность должна обеспечиваться конструкцией электроустановок, техническими способами и средствами защиты. Электроустановки и их части выполнены таким образом, чтобы работающие не подвергались опасным и вредным воздействиям электрического тока и электромагнитных полей, и соответствовать требованиям электробезопасности.

Согласно [51] помещения по электробезопасности помещения классифицируются

- безопасные;
- с повышенной опасностью;
- особо опасные.

Используемое помещение относится к классу помещений с повышенной опасностью, так как в данном помещении возможно одновременное прикосновения человека к имеющей соединение с землей металлоконструкцией здания с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования, с другой стороны. Также присутствует ядовитый взрывоопасный газ. Граничные значения напряжений, при повышении которых требуется выполнение защиты от косвенного прикосновения для помещений с повышенной опасностью составляет >25 В переменного тока и >60 В постоянного тока [52].

Для предотвращения поражения электрическим током следует проводить следующие мероприятия:

1. содержать оборудование в работоспособном состоянии и эксплуатировать его в соответствии с нормативно-техническими документами;
2. своевременно проводить техническое обслуживание;

3. соблюдать технику безопасности при работе с оборудованием;

4. проводить инструктаж для работников.

В качестве мероприятий по обеспечению безопасности работы с электрооборудованием могут быть использованы:

1. изоляция токоведущих частей;

2. малое напряжение в электрических цепях;

3. защитное заземление, зануление, защитное отключение;

4. применение разделяющих трансформаторов;

5. использование оболочек и блокировок для предотвращения возможности случайного прикосновения к токоведущим частям и ошибочных действий или операций;

6. защитные средства и предохранительные приспособления.

В лаборатории 101, где проводилась работа на ионно-плазменной установке, имеются следующие индивидуальные средства защиты:

– основные: изолирующие клещи и электроизмерительные указатели напряжения, диэлектрические перчатки;

– дополнительные: диэлектрические галоши, диэлектрические коврики, изолирующие подставки.

Безопасным для организма человека можно считать переменный ток силой не выше 0,05 А ток силой более 0,05 - 0,1 А опасен и может вызвать смертельный исход.

Безопасным напряжением для человека считается напряжение 42 В в нормальных условиях и 12 В в условиях повышенной опасности (сырость, высокая температура, металлические полы и др.).

4. Отклонение показателей микроклимата в помещении

При работе установки включены охлаждающие системы и одновременно с этим процессом происходит нагрев вакуумной камеры, что

приводит к изменению микроклимата в помещении. Параметрами, характеризующими микроклимат, являются:

1. температура воздуха;
2. относительная влажность воздуха;
3. скорость движения воздуха.

Выполняемые работы относятся к Іб категории работ. К данной категории относятся работы с интенсивностью энергозатрат 121–150 ккал/ч (140–174 Вт), производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся некоторым физическим напряжением. Температура наружных поверхностей технологического оборудования, ограждающих устройств, с которыми соприкасается в процессе труда человек, не превышает 45 °С.

Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 - Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	21-23	60-40	0,1
Теплый	22-24	60-40	0,1

Для создания оптимальных метеорологических условий применяется кондиционер, который поддерживает оптимальные параметры микроклимата автоматически, независимо от меняющихся условий. В холодное время года для поддержания в помещении оптимальной температуры воздуха применяется отопление.

Рассчитаем объем помещения

$$V = S \cdot H = 137,75 \cdot 3,7 = 509,68 \text{ м}^3 \quad (5.9)$$

Кратность воздухообмена для производственных помещений согласно [53], определяется как

$$K_v = \frac{L_{\text{возд}}}{V_{\text{помещ}}} \quad (5.10)$$

где $L_{\text{возд}}$ – расчётный воздухообмен помещения, м³/ч;

$V_{\text{помещ}}$ – объем помещения, м³.

Расчётный воздухообмен помещения вычисляют по формуле:

$$L = L_0 \cdot N \quad (5.11)$$

где L_0 — нормативный воздухообмен на 1 человека, м³/(чел·ч);

N – количество людей в помещении.

Для лабораторий нормативный воздухообмен на 1 человека в производственных помещениях с естественным проветриванием составляет 30 м³/(чел·ч) [53], в лаборатории 101 НОЦ Б.П. Вейнберга Томского политехнического университета постоянно находятся 7 человек, однако в лаборатории также регулярно пребывают студенты, поэтому рассчитаем воздухообмен для 15 человек.

$$L = 30 \cdot 15 = 450 \text{ м}^3/\text{ч} \quad (5.12)$$

Следовательно кратность воздухообмена равна

$$K_v = \frac{450}{509,68} \approx 0,88 = 1 \quad (5.13)$$

Подберем систему кондиционирования со следующей производительностью

$$L = 1 \cdot 509,68 = 510 \text{ м}^3/\text{ч} \quad (5.14)$$

Выбран вентилятор с производительностью 750 м³/ч [54].

5. Фактор, обладающий свойствами химического воздействия на организм

Химические вещества, используемые при азотировании и нанесении упрочняющих покрытий, находятся в газообразном состоянии. При выполнении работ на установке, есть опасность проникновения этих химических веществ в организм человека через органы дыхания, глаза, поверхности ран, желудочно-кишечный тракт, кожу, и возникновения при этом

местных или общих поражений. В результате этого могут быть поражены внутренние органы, нервная система и головной мозг. В таблице 5.4 приведены характеристик веществ, используемых при работе на ионно-плазменной вакуумной установке, их характеристики, воздействие данных веществ на человека и меры оказания первой медицинской помощи при проявлении признаков отравления данными веществами.

Для обеспечения безопасности при работе на вакуумной установке используются следующие технические способы и средства коллективной и индивидуальной защиты:

- средства защиты органов дыхания (респираторы, противогаз, защитная маска);
- вытяжная вентиляция;
- дополнительная вытяжная вентиляция над камерой;
- средство защиты глаз (очки).

Также персонал, при работе на установке, должен быть обеспечен спецодеждой (халат х/б, перчатки резиновые, нарукавники пластиковые (дежурные), спецобувь (сапоги) [55].

Таблица 5.4 – Характеристики веществ, используемых при работе на ионно-плазменной установке, их воздействие на человека и меры оказания первой медицинской помощи при проявлении признаков отравления

Наименование	Характеристика	ПДК в воздухе рабочей зоны, мг/м³	Класс опасности	Оказание первой медицинской помощи при отравлении
Аргон	Газ без цвета и запаха	0,1-1,0	2 класс опасности [56]	Свежий воздух, покой. Обратиться за медицинской помощью.

Продолжение таблицы 5.4.

Наименование	Характеристика	ПДК в воздухе рабочей зоны, мг/м ³	Класс опасности	Оказание первой медицинской помощи при отравлении
Азот	Газ без цвета и запаха	Более 10,0	4 класс (малоопасное вещество) [57]	Свежий воздух, покой. Обратиться за медицинской помощью.

5.2.2 Снижение воздействия опасных и вредных факторов

Условия эксплуатации вакуумной установки:

- численность работающих на установке: 2-4 человека;
- производственный шум: менее 50 дБ;
- уровень вибрации: отсутствует;
- загрязненность и запыленность воздушной среды: отсутствует;
- влажность воздуха: 45%;
- скорость движения воздуха: 0,2 м/с;
- электромагнитные излучения: отсутствуют;
- классификация помещения по степени опасности поражения электрическим током: повышенной опасности;
- наличие химических веществ в сжатом виде в отдельных секторах с дополнительной вентиляцией.

В производственном помещении, где расположена вакуумная установка, оптимальные величины температуры воздуха и его относительной влажности соблюдаются. Повышенная скорость движения воздуха объясняется постоянной работой вытяжной вентиляции, которая обеспечивает удаление из помещения загрязненного воздуха, поскольку в ходе технологического

процесса и при обслуживании установки в воздухе присутствуют пары этилового спирта (используется для обезжиривания компонентов установки).

Для защиты от высокого напряжения, формируемому узлами установки, используются коллективные и индивидуальные средства защиты. Предлагаемыми средствами коллективной защиты от данного опасного фактора являются: информационные таблички, размыкатели и встроенная в генераторе система отключения при коротком замыкании, защитное заземление. В качестве средств индивидуальной защиты должны использоваться диэлектрические перчатки, штанги для снятия остаточного напряжения, и диэлектрические коврики [52].

5.3 Пожаровзрывобезопасность

Пожар – неконтролируемое горение вне специального очага, наносящее материальный ущерб и способное вызвать травмы и гибель людей.

Согласно [58] выделяют следующие опасные факторы пожара.

1. Открытый огонь и искры;
2. повышенная температура окружающей среды;
3. токсичные продукты горения полимерных материалов;
4. пониженная концентрация кислорода;
5. дым;
6. обрушение конструкций.

Помещения подразделяются на категории А, Б, В1 – В4, Г и Д, а здания – на категории А, Б, В, Г и Д [59]. Определение категорий помещений осуществляется путем последовательной проверки принадлежности помещения к категориям от высшей (А) к низшей (Д).

Таблица 5.5 – Классификация помещений по степени их пожаровзрывоопасности

Категория	Характеристика веществ и материалов помещения, находящихся (образующихся) в помещении
А	Горючие газы (ГГ), легковоспламеняющиеся взрывопожароопасные жидкости (ЛВЖ) с температурой вспышки не более 28°С в таком количестве, что могут образовывать взрывоопасные парогазовоздушные смеси, при воспламенении которых развивается расчетное избыточное давление взрыва в помещении, превышающее 5 кПа.
Б	Горючие пыли или волокна, ЛВЖ взрывопожароопасные с температурой вспышки более 28°С, горючие жидкости (ГЖ) в таком количестве, что могут образовывать взрывоопасные пылевоздушные или паровоздушные смеси, при воспламенении которых развивается расчетное избыточное давление взрыва в помещении, превышающее 5 кПа.
В1-В4	ГЖ и трудногорючие жидкости, твердые пожароопасные горючие и трудногорючие вещества и материалы (в том числе пыли и волокна), веществ и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть, при условии, что помещения, в которых они имеются в наличии или обращаются, не относятся к категориям А или Б.
Г	Негорючие вещества и материалы в горячем, раскаленном или расплавленном состоянии, процесс обработки которых сопровождается выделением лучистого тепла, искр и пламени; ГГ, ГЖ и твердые вещества, которые сжигаются или утилизируются в качестве топлива.
Д	Негорючие вещества и материалы в холодном состоянии.

К пожароопасной категории В следует относить помещения, в технологическом процессе которых находятся или обращаются горючие материалы, при этом уровень пожарной опасности учитывается введением такого критерия как пожарная нагрузка и устанавливается дифференцированной классификацией, в соответствии с которой помещения категории В разделяются на 4 категории (В1, В2, В3, В4) в зависимости от удельной временной пожарной нагрузки (в помещении).

Лаборатория 101 научно-образовательного центра им. Б.П. Вейнберга относится к категории помещения В4, удельная пожарная нагрузка в котором составляет 1 – 180 мДж/м².

Приведём классификацию пожароопасных зон [59].

Таблица 5.6 – Классификация взрывоопасных зон

Класс	Характеристика помещения
П-I	зоны, расположенные в помещениях, в которых обращаются горючие жидкости с $T_{всп.}$ выше 61°C.
П-II	зоны, расположенные в помещениях, в которых выделяются горючие пыль или волокна с НКПВ более 65 г/м ³ к объему воздуха.
П-IIa	зоны, расположенные в помещениях, в которых обращаются твердые горючие вещества.
П-III	расположенные вне помещений зоны, в которых обращаются горючие жидкости с $T_{всп.}$ выше 61°C или твердые горючие вещества

Лаборатория 101 научно-образовательного центра им. Б.П. Вейнберга относится к П-IIa классу.

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

В данном помещении используются (обращаются) негорючие вещества и горючие газы, жидкости и твердые вещества. Также в данном помещении расположены баллоны с инертными и реакционными газами (азот, аргон, водород, кислород).

В таблице 5.7 приведены возможные чрезвычайные ситуации (ЧС), которые могут возникнуть в лаборатории 101 НОЦ Б.П. Вейнберга, меры предосторожности, меры по ликвидации последствий ЧС.

Таблица 5.7 - Возможные чрезвычайные ситуации (ЧС), которые могут возникнуть в лаборатории 101 НОЦ Б.П. Вейнберга, меры по предосторожности, меры по ликвидации последствий ЧС

№	Тип ЧС	Меры предосторожности	Меры по ликвидации последствий
1	Возникновение пожара	<ul style="list-style-type: none"> – использование только исправного оборудования; – проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности; – отключение электрооборудования, освещения и электропитания при предполагаемом отсутствии обслуживающего персонала или по окончании работ. 	<ul style="list-style-type: none"> – вызвать пожарный расчет (тел. 01, моб. 101, 112); – отключить электропитание, выключить вентиляцию; – закрыть двери и окна, чтобы убрать доступ кислорода для горения; – воспользоваться первичными средствами пожаротушения (огнетушитель ВП, УК или П) или песком. При невозможности – начать эвакуацию людей из помещения; – сообщить о пожаре администрации лаборатории и института.

Продолжение таблицы 5.7

№	Тип ЧС	Меры предосторожности	Меры по ликвидации последствий ЧС
3	Пожар, вследствие короткого замыкания в цепях электропитания оборудования	<ul style="list-style-type: none"> – проведение периодических инструктажей по электробезопасности; – содержать оборудование в работоспособном состоянии и эксплуатировать его в соответствии с нормативно-техническими документами. 	<ul style="list-style-type: none"> – обесточить ионно-плазменную установку, переместив в нижнее положение ручку рубильника; – отключить подачу водоохлаждения; – вызвать МЧС (моб. 112).
3	Разгерметизация газовых баллонов, повлекшая за собой удушье человека или взрыв	<ul style="list-style-type: none"> – проведение периодических инструктажей по работе с газовыми баллонами; – устанавливать баллоны вертикально и на расстоянии не менее 1 метра от радиаторов и не менее 5 метров от источников тепла с открытым огнём [60]. 	<ul style="list-style-type: none"> – покинуть помещение, оставив включенной вентиляцию до полного исчезновения запаха; – вызвать МЧС (моб. 112).

Вывод по разделу Социальная ответственность

В данном разделе были рассмотрены вредные и опасные факторы при эксплуатации экспериментальной ионно-плазменной установки, а именно: повышенный уровень шума [44]; освещение [45]; микроклимат [47], электробезопасность [51]; повышенная пожаро- и взрывоопасность [59].

Помещение 101 НОЦ им. Б.П. Вейнберга отнесено:

- по электробезопасности к классу помещения с повышенной опасностью [51];
- по пожаровзрывоопасности к категории В4 [59].

Приведены возможные чрезвычайные ситуации (ЧС), которые могут возникнуть в лаборатории 101 НОЦ Б.П. Вейнберга, меры по предосторожности, меры по ликвидации последствий ЧС.

Заключение

В настоящей выпускной квалификационной работе рассмотрено влияние длительности предварительного ионно-плазменного азотирования в высокочастотном разряде на механические и функциональные свойства стали 40х13 после дуплексной обработки.

1. Исследование кристаллической структуры после дуплексной обработки стали показало наличие твёрдых растворов внедрения (γ' -Fe₄N и ϵ -Fe₂₋₃N), образовавшихся в процессе ИПА, и химических соединений AlN и CrN, относящихся к покрытию.
2. При исследовании оптической микроскопии шлифа получено, что в процессе ИПА на рост диффузионной зоны оказывают влияние два конкурирующих процесса: насыщение и распыление поверхностного слоя азотом и его ионами.
3. Шероховатость поверхности увеличивается с применением предварительного ИПА и растёт при увеличении его длительности. Данный результат демонстрирует необходимость регулирования длительности ИПА.
4. В работе применены две техники измерения твёрдости ввиду необходимости анализа свойств и покрытия, и материала подложки. Твёрдость покрытия приблизительно 13 раз (23 ГПа) превышает твёрдость исходной стали (2 ГПа). При применении предварительного ИПА величина твёрдости не изменяется с увеличением глубины проникновения индентора, при отсутствии ИПА происходит спад плёнки до твердости необработанной подложки.
5. В ходе исследования твёрдости стали по глубине азотированного слоя получено, что ИПА приводит к увеличению, твердости стали приблизительно в 7 раз (14 ГПа). На всем промежутке толщины азотированного слоя твердость остается неизменной.

6. Исследована адгезионная прочность покрытия. Получено, что ИПА приводит к увеличению адгезионной прочности при длительности до 40 мин, большая длительность предварительной ИПА приводит к значительному изменению шероховатости поверхности и снижению адгезии.
7. Износостойкость поверхности после дуплексной обработки увеличилась более чем на 2 порядка, что подтверждает актуальность применения ИПА перед нанесением покрытий.

Оптимальные параметры адгезионной прочности и износостойкости покрытия достигнуты при длительности ИПА, равной 40 мин.

Список используемой литературы

1. Alphonsa I. et al. A study of martensitic stainless steel AISI 420 modified using plasma nitriding //Surface and Coatings Technology. – 2002. – Т. 150. – №. 2-3. – P. 263-268.
2. Shi L. et al. Improving the wear resistance of heavy-duty gear steels by cyclic carburizing //Tribology International. – 2022. – С. 107576.
3. Hoche H., Pusch C., Oechsner M. Corrosion and wear protection of mild steel substrates by innovative PVD coatings //Surface and Coatings Technology. – 2020. – Т. 391. – С. 125659.
4. Funch C. V., Christiansen T. L., Somers M. A. J. Gaseous nitriding of additively manufactured maraging steel; nitriding kinetics and microstructure evolution //Surface and Coatings Technology. – 2022. – С. 128055.
5. Fu Y. et al. Characterization and tribological evaluation of duplex treatment by depositing carbon nitride films on plasma nitrided Ti-6Al-4V //Journal of materials science. – 2000. – Т. 35. – №. 9. – P. 2215-2227.
6. Лапшинов Б. А. Нанесение тонких пленок методом вакуумного термического испарения //М.: Моск. гос. ин-т электроники и математики. – 2006.
7. Духопельников Д.В. Магнетронные распылительные системы: устройство, принципы работы, применение – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 54 с.
8. Tudose I. V. et al. Chemical and physical methods for multifunctional nanostructured interface fabrication //Functional Nanostructured Interfaces for Environmental and Biomedical Applications. – Elsevier, 2019. – P. 15-26.
9. Khamseh S. et al. Influence of total gas pressure on the microstructure and properties of CrAlN films deposited by a pulsed DC balanced magnetron sputtering system //Journal of Alloys and Compounds. – 2010. – Т. 503. – №. 2. – P. 389-391.

10. Ding X. Z., Zeng X. T. Structural, mechanical and tribological properties of CrAlN coatings deposited by reactive unbalanced magnetron sputtering //Surface and Coatings Technology. – 2005. – Т. 200. – №. 5-6. – P. 1372-1376.
11. Lin J. et al. Microstructure, mechanical and tribological properties of Cr_{1-x}Al_xN films deposited by pulsed-closed field unbalanced magnetron sputtering (P-CFUBMS) //Surface and Coatings Technology. – 2006. – Т. 201. – №. 7. – P. 4329-4334.
12. Barshilia H. C. et al. A comparative study of reactive direct current magnetron sputtered CrAlN and CrN coatings //Surface and Coatings Technology. – 2006. – Т. 201. – №. 6. – P. 2193-2201.
13. Xia B. et al. Multilayer architecture design to enhance load-bearing capacity and tribological behavior of CrAlN coatings in seawater //Ceramics International. – 2021. – Т. 47. – №. 19. – P. 27430-27440.
14. Spain E. et al. Characterisation and applications of Cr–Al–N coatings //Surface and Coatings Technology. – 2005. – Т. 200. – №. 5-6. – P. 1507-1513.
15. Rajabi T. et al. Nanometric CrN/CrAlN and CrN/ZrN multilayer physical vapor deposited coatings on 316L stainless steel as bipolar plate for proton exchange membrane fuel cells //Thin Solid Films. – 2022. – С. 139288.
16. Лахтин Ю. М. и др. Теория и технология азотирования //М.: Металлургия. – 1991. – С. 320.
17. Берлин Е. В., Коваль Н. Н., Сейдман Л. А. Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей. – 2012.
18. Зубарев Ю. М. Специальные методы обработки заготовок в машиностроении: учебное пособие / Ю. М. Зубарев. – Санкт-Петербург. – 2015.
19. Roliński E. Plasma-assisted nitriding and nitrocarburizing of steel and other ferrous alloys //Thermochemical Surface Engineering of Steels. – Woodhead Publishing, 2015. – P. 413-457.

20. Akbari A. et al. Effect of the initial microstructure on the plasma nitriding behavior of AISI M2 high speed steel //Surface and Coatings Technology. – 2010. – Т. 204. – №. 24. – P. 4114-4120.
21. Кузнецов С. И. Курс физики с примерами решения задач. Часть II. Электричество и магнетизм. Колебания и волны: учебное пособие / С. И. Кузнецов. – 2015.
22. Белый А. В. и др. Инженерия поверхностей конструкционных материалов с использованием плазменных и пучковых технологий. – 2017.
23. Moradshahi M. et al. Plasma nitriding of Al alloys by DC glow discharge //Surface and Coatings Technology. – 2006. – Т. 201. – №. 3-4. – P. 567-574
24. Xi Y., Liu D., Han D. Improvement of corrosion and wear resistances of AISI 420 martensitic stainless steel using plasma nitriding at low temperature //Surface and Coatings Technology. – 2008. – Т. 202. – №. 12. – P. 2577-2583
25. Wang L., Ji S., Sun J. Effect of nitriding time on the nitrided layer of AISI 304 austenitic stainless steel //Surface and Coatings Technology. – 2006. – Т. 200. – №. 16-17. – P. 5067-5070.
26. Wardana I. N. G. et al. Effect of Hydrogen Addition on the Characteristics of Nitrided Martensitic Stainless Steel AISI 420 //Applied Mechanics and Materials. – Trans Tech Publications Ltd, 2016. – Т. 836. – P. 214-218.
27. Kim S. K. et al. Characteristics of martensitic stainless steel nitrided in a low-pressure RF plasma //Surface and Coatings Technology. – 2003. – Т. 163. – P. 380-385.
28. Громилов С. А. Введение в рентгенографию поликристаллов //Учебное методическое пособие. –Новосибирск: НГУ. – 2009.
29. Курзина И.А. К93 Рентгенофазовый анализ нанопорошков. Методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу «Отрасли наноиндустрии. Области 107 применения наноматериалов» для

- магистрантов, обучающихся по направлению 150600 «Материаловедение и технология новых материалов» / сост. Курзина И.А., Годымчук А.Ю., Качаев А.А. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 14 с.
30. Санников А. А., Исаков С. Н. Лабораторные работы по трибологии и триботехнике. – 2015.
31. ПТИ 899–ЦКЛК–145–2013 “Работа на инвертированном микроскопе отраженного света Axiovert 200MAT. Производственно–техническая инструкция”
32. Нанотвердомер ННТ2. Руководство по эксплуатации ННТ2 -02РЭ
33. Определение твердости металлов и сплавов: Методическое руководство к выполнению лабораторной работы / Сост. : А. В. Павлов, А. Г. Уфаев; ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ им. Н. И. Вавилова». – Саратов, 2016. – 20 с.
34. Высокотемпературный трибометр (PC-Operated High Temperature Tribometer ТНТ-S-AX0000): [Электронный ресурс] // корпоративный портал ТПУ – Режим доступа: https://portal.tpu.ru/departments/centre/cism_fti/tech_base/tribometr
35. Прибор для измерения адгезионной прочности покрытий: [Электронный ресурс] // Корпоративный портал ТПУ - Режим доступа: http://portal.tpu.ru:7777/departments/centre/cism_fti/tech_base/microscratch
36. Сиделёв Д.В. и др. Азотирование стали 40x13 в индуктивно-связанной плазме: влияние потенциала смещения // Прикладная физика. – 2022. – №. 2. – С. 16 – 23.
37. Das K. et al. Influence of pretreatment on surface behavior of duplex plasma treated AISI H13 tool steel //Surfaces and Interfaces. – 2017. – Т. 8. – P. 206-213.
38. Farokhzadeh K., Edrisy A. 2.4 Surface Hardening by Gas Nitriding. // Comprehensive Materials Finishing. – 2017. – P. 107-136.
39. Wang Q. J., Chung Y. W. Encyclopedia of tribology. – Springer, 2013.

40. Grudinin V. A. et al. Hot target magnetron sputtering enhanced by RF-ICP source: Microstructure and functional properties of CrNx coatings //Vacuum. – 2022. – Т. 200. – С. 111020.
41. ГОСТ 12.0.004-2015 ССБТ. Организация обучения безопасности труда. Общие положения
42. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы" (с изменениями на 21 июня 2016 года)
43. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация
44. ГОСТ 12.1.003–83 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности
45. СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение»
46. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность»
47. СанПин 2.2.4.548-96. «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений»
48. ГОСТ 12.1.004-85 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования
49. Спиральный вакуумный насос Anest iwata ISP-250C [Электронный ресурс] // Интернет-магазин «Вакуум-маркет» URL <https://vacuum-market.ru/catalog/vakuumnye-nasosy/spiralnye/anest-iwata-isp-250s/> (Дата обращения 18.05.2022)
50. Светильник ALS.OPL 418 HF ES1 [Электронный ресурс] // Интернет-магазин «ЭТМ» URL: <https://www.etm.ru/cat/nn/2423476> (Дата обращения 18.05.2022)
51. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты
52. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов
53. СНиП 41-01-2003 «Отопление, вентиляция и кондиционирование»

54. Приточная установка ФЬОРДИ ВПУ-800/9 кВт/3-GTC (380В) [Электронный ресурс] // Интернет-магазин «Благовест» URL: https://blagovest.ru/catalog/ventilyatsionnye_ustanovki/pritochnye_ustanovki/ordi_vpu/pritochnaya_ustanovka_fordi_vpu_800_9_kvт_3_gtc_380v/ (Дата обращения 18.05.2022)
55. ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация
56. ГОСТ 10157-2016 Агон газообразный и жидкий. Технические условия
57. ГОСТ 9293-74 Азот газообразный и жидкий. Технические условия
58. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования
59. СП 12.13130.2009 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывоопасной и пожарной безопасности
60. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. Инструкция по охране труда при хранении и эксплуатации газовых баллонов [Электронный ресурс] – Режим доступа <http://docs.cntd.ru/document/1200039245>