



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

Школа Инженерная школа новых производственных технологий
Направление подготовки Материаловедение и технологии материалов
ООП/ОПОП Материаловедение в машиностроении
Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРАНТА

Тема работы
Особенности формирования структуры упрочненных слоев в моно- и поликристаллах аустенитной нержавеющей стали, сформированных при ионно-плазменной обработке

УДК 669.15-194.56:621.785.5

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ11	Загibalова Елена Андреевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ, ИШНПТ	Ваулина О.Ю.	к.т.н., доцент		

Консультанты

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. ЛФИСМС, ИФПМ СО РАН	Астафурова Е.Г.	д.ф.-м.н., доцент		
С.н.с. ЛФИСМС, ИФПМ СО РАН	Астафуров С.В.	к.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН, ШБИП	Гасанов М.А.	д.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД, ШБИП	Антоневич О.А.	к.б.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП/ОПОП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОМ ИШНПТ	Бужкова С.П.	д.т.н, профессор		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном языке, для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен решать производственные и/или исследовательские задачи, на основе фундаментальных знаний в области материаловедения и технологии материалов
ОПК(У)-2	Способен разрабатывать научно-техническую, проектную и служебную документацию, оформлять научно-технические отчеты, обзоры, публикации, рецензии
ОПК(У)-3	Способен участвовать в управлении профессиональной деятельностью, используя знания в области системы менеджмента качества
ОПК(У)-4	Способен находить и перерабатывать информацию, требуемую для принятия решений в научных исследованиях и в практической технической деятельности
ОПК(У)-5	Способен оценивать результаты научно-технических разработок, научных исследований и обосновывать собственный выбор, систематизируя и обобщая достижения в области материаловедения и технологии материалов, смежных областях
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен использовать современные информационно-коммуникационные технологии, глобальные информационные ресурсы в научно-исследовательской и расчетно-аналитической деятельности в области материаловедения и технологии материалов
ПК(У)-2	Способен осуществлять сбор данных, изучать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию по тематике исследования, разработке и использованию технической документации, основным нормативным документам по вопросам интеллектуальной собственности, подготовке документов к патентованию, оформлению ноу-хау
ПК(У)-3	Готов использовать методы моделирования при прогнозировании и оптимизации технологических процессов и свойств материалов, стандартизации и сертификации материалов и процессов

ПК(У)-4	Способен использовать в исследованиях и расчетах знания о методах исследования, анализа, диагностики и моделирования свойств веществ (материалов), физических и химических процессах, протекающих в материалах при их получении, обработке и модификации
ПК(У)-5	Готов выполнять комплексные исследования и испытания при изучении материалов и изделий, включая стандартные и сертификационные, процессов их производства, обработки и модификации
ПК(У)-6	Способен использовать на практике современные представления о влиянии микро - и нано- структуры на свойства материалов, их взаимодействии с окружающей средой, полями, частицами и излучениями
ПК(У)-7	Способен выбирать и применять соответствующие методы моделирования физических, химических и технологических процессов
ПК(У)-8	Готов исполнять основные требования делопроизводства применительно к записям и протоколам; оформлять проектную и рабочую техническую документацию в соответствии с нормативными документами
ПК(У)-9	Готов участвовать в разработке технологических процессов производства и обработки покрытий, материалов и изделий из них, систем управления технологическими процессами
ДПК(У)-1	Способен применять знания об основных типах современных неорганических и органических материалов, принципах выбора материалов для заданных условий эксплуатации с учетом требований технологичности, экономичности, надежности и долговечности, экологических последствий их применения при проектировании высокотехнологичных процессов



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

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

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП/ОПОП
_____ Буякова С.П.
(Подпись) (Дата) (ФИО)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
4БМ11	Загибалова Елена Андреевна

Тема работы:

<i>Особенности формирования структуры упрочненных слоев в моно- и поликристаллах аустенитной нержавеющей стали, сформированных при ионно-плазменной обработке</i>	
Утверждена приказом директора ИШНПТ	Приказ № 136-52/с от 16.05.2023

Срок сдачи студентом выполненной работы:	14.06.2023
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	<p>Объектами исследования являются гетерофазные слои в моно- и поликристаллических образцах аустенитной нержавеющей стали, сформированные при ионно-плазменном насыщении при температуре 550°C.</p> <p>Данный метод обработки позволяет повысить поверхностную твердость и износостойкость изделия за счет формирования модифицированных областей вблизи насыщаемой поверхности. Данный метод является экологичным и экономически выгодным.</p>
---------------------------------	---

Перечень разделов пояснительной записки подлежащих исследованию, проектированию и разработке	Обзор литературы с целью получить представление о достижениях мировой науки в рассматриваемой области; постановка цели и задач исследования; рассмотрение материала и методов исследования; результаты проведенного исследования и обсуждение полученных данных; раздел, посвященный финансовому менеджменту, ресурсоэффективности и ресурсосбережению; раздел по социальной ответственности при выполнении данной работы; заключение по работе
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	-
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
<i>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</i>	Гасанов Магеррам Али оглы, д.э.н., профессор отделения социально-гуманитарных наук ШБИП НИ ТПУ
<i>Социальная ответственность</i>	Антоневич Ольга Алексеевна, к.б.н., доцент отделения общетехнических дисциплин ШБИП НИ ТПУ
<i>Раздел на английском языке</i>	Зяблова Наталия Николаевна, к.ф.н., доцент отделения иностранных языков ШБИП НИ ТПУ
Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:	
1. Литературный обзор	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	30.01.2023
---	------------

Задание выдал руководитель ВКР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ, ИШНПТ	Ваулина О.Ю.	к.т.н., доцент		

Согласовано:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. ЛФИСМС ИФПМ СО РАН	Астафурова Е.Г.	д.ф.-м.н., доцент		
С.н.с. ЛФИСМС ИФПМ СО РАН	Астафуров С.В.	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ11	Загibalова Елена Андреевна		



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

Школа Инженерная школа новых производственных технологий
Направление подготовки ООП Материаловедение и технологии материалов
Уровень образования Магистратура
Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения
Период выполнения 2022 /2023 учебный год

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Обучающийся

Группа	ФИО
4БМ11	Загibalова Елена Андреевна

Тема работы:

<i>Особенности формирования структуры упрочненных слоев в моно- и поликристаллах аустенитной нержавеющей стали, сформированных при ионно-плазменной обработке</i>	
Срок сдачи студентом выполненной работы:	14.06.2023

Дата контроля	Название раздела (модуля)/вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
08.05.2023	Основная часть	75
22.05.2023	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
05.06.2023	Социальная ответственность	10

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ, ИШНПТ	Ваулина О.Ю.	к.т.н., доцент		

Консультанты

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. ЛФИСМС ИФПМ СО РАН	Астафурова Е.Г.	д.ф.-м.н., доцент		
С.н.с. ЛФИСМС ИФПМ СО РАН	Астафуров С.В.	к.ф.-м.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП/ОПОП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОМ ИШНПТ	Буякова С.П.	д.т.н., профессор		

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ11	Загibalова Елена Андреевна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 122 с., 19 рис., 27 табл., 76 источников, 1 прил.

Ключевые слова: аустенитная нержавеющая сталь, ионно-плазменная обработка, монокристаллы, упрочненные поверхностные слои, гетерофазный слой, CrN, Fe₄N, легированный азотом/углеродом аустенит, α-Fe.

Объектом исследования являются монокристаллы (Fe-18,6Cr-16,8Ni-0,07Mn-0,07Si-0,001C мас. %) и поликристаллы (Fe-16,8Cr-13,3Ni-2,7Mo-1,7Mn-0,6Si-0,01C мас. %) аустенитной нержавеющей стали, в которых поле ионно-плазменного насыщения в смеси газов (аргона, азота и ацетилена) при температуре 550°C сформировались поверхностные упрочненные слои с гетерофазным составом.

Цель работы – выявить особенности микроструктуры, фазовый состав и микротвердость поверхностно-упрочненного слоя, сформированного ионно-плазменной обработкой <001>- и <111>-монокристаллов и поликристаллов аустенитной нержавеющей стали при температуре 550°C в смеси газов (азот, аргон, ацетилен).

В ходе работы проводились исследования при помощи следующих методов: дифракции обратнорассеянных электронов, металлография, электронная сканирующая микроскопия, энергодисперсионный спектральный микроанализ, просвечивающая электронная микроскопия, микротвердость (метод Виккерса), рентгенофазовый анализ.

В результате исследований была выявлена ориентационная зависимость протяженности поверхностного упрочненного слоя, сформированного в ходе ионно-плазменного насыщения при температуре 550°C: толщина модифицированной области в <001>-монокристалле больше, чем в <111>-монокристалле.

Степень внедрения: данное исследование является инициативным, но его результаты являются дополнением к проекту РФФИ № 20-38-70031 «Механизмы формирования упрочненных слоев при ионно-плазменной обработке аустенитной нержавеющей стали в смеси газов (С, Н, N)».

Область применения: авиа- и машиностроении, медицине, пищевая, нефтегазовая промышленности и т.д.

В будущем планируется более детально исследовать полученные гетерофазные слои на сопротивление износу, а также расширить круг данных для подбора режима ИПО изделий из АНС

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

1. АНС – аустенитная нержавеющая сталь;
2. ГЦК – гранцентрированная кубическая решетка (γ);
3. ДОЭ – дифракция обратнорассеянных электронов;
4. ИПО – ионно-плазменная обработка;
5. ПЭМ – просвечивающая электронная микроскопия;
6. СЭМ – сканирующая электронная микроскопия;
7. ТМО – термомеханическая обработка;
8. ХТО – химико-термическая обработка;
9. ЭДУ – энергия дефекта упаковки;
10. T – температура;
11. $T_{\text{обр.}}$ – температура обработки;
12. a – параметр кристаллической решетки, в случае гранцентрированной кубической решетки длина ребра куба;
13. С – углерод;
14. Cr – хром;
15. Fe- $\gamma_{\text{N,C}}$ – аустенит, легированный атомами внедрения: азотом и углеродом;
16. Mo – молибден;
17. N – азот;
18. Ni – никель;

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	11
1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	12
1.1 Характеристика аустенитных хромоникелевых сталей	12
1.2 Влияние химико-термической обработки в среде газа и плазмы на свойства аустенитных нержавеющей сталей.....	14
1.3 Положение атомов внедрения в ГЦК кристаллической решетке	15
1.4 Изменение фазового состава и свойств поверхностных слоев аустенитной нержавеющей стали при ионно-плазменном азотировании.....	17
1.5 Монокристаллы.....	25
1.6 Методы получения монокристаллов.....	26
1.7 Ориентационная зависимость параметров поверхностях слоев, сформированных при ионно-плазменном насыщении атомами внедрения моно- и поликристаллических образцов аустенитной нержавеющей стали	28
2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА ...	31
2.1 Постановка задач исследования	31
2.2 Материал и методы исследования	32
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	34
3.1 Исследование микроструктуры монокристаллов АНС до ионно-плазменного насыщения методом металлографии	34
3.2 Металлографический анализ микроструктуры монокристалла АНС после ионно-плазменного насыщения	35
3.3 Распределение химических элементов в монокристаллических образцах АНС после ионно-плазменного насыщения	36
3.4 Профили распределения микротвердости от обработанной поверхности вглубь монокристаллов АНС после ИПО	38
3.5 Исследование фазового состава упрочненных поверхностных слоев и матрицы монокристаллических образцов АНС методом просвечивающей электронной микроскопии	40
3.6 Параметры поверхностно-упрочненного слоя, сформированного в поликристаллическом образце аустенитной нержавеющей стали после ионно-плазменного насыщения.....	43
3.7 Анализ и обсуждение полученных результатов исследования.....	46
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ».....	50
4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	51
4.1 Предпроектный анализ.....	51
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	51
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	52

4.1.3 SWOT-анализ.....	54
4.2 Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	56
4.3 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования.....	57
4.4 Инициация проекта.....	57
4.5 Планирование управления научно-техническим проектом.....	61
4.5.1 Иерархическая структура работ проекта.....	61
4.5.2 План проекта.....	62
4.6 Бюджет научного исследования.....	64
4.7 Вывод по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».....	71
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ».....	72
5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	74
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	74
5.2 Производственная безопасность.....	77
5.3 Экологическая безопасность.....	85
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	87
5.5 Выводы по разделу «Социальная ответственность».....	87
Заключение.....	89
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ.....	91
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	98
Приложение.....	105

ВВЕДЕНИЕ

Хорошие коррозионная стойкость, пластичность и свариваемость аустенитных нержавеющей сталей (АНС) позволяют находить им применение в авиа- и машиностроении, медицине и других отраслях промышленности. Ограничением для более широкого применения служат низкие износостойкость и поверхностная твердость АНС. Низкотемпературная ($T < 450^{\circ}\text{C}$) ионно-плазменная обработка (ИПО) в среде, содержащей азот (N) и углерод (C), позволяет повысить поверхностную твердость изделия в несколько раз, сохранив при этом его коррозионную стойкость за счет формирования поверхностного слоя из пересыщенного азотом и углеродом аустенита ($\text{Fe-}\gamma_{\text{N,C}}$). Модифицирование при температурах выше $T > 500^{\circ}\text{C}$ приводит к формированию гетерофазных слоев с толщиной большей, чем у однофазных, но при этом наблюдается снижение коррозионной стойкости материала, что может негативно отразиться на эксплуатационных свойствах обработанного изделия/детали.

Толщина модифицированных поверхностных слоев зависит от целого ряда факторов: параметры ИПО, микроструктура и химический состав исходного материала, а также кристаллографическая ориентация зерна по отношению к насыщаемой поверхности. В исследованиях О. Öztürk [1], после ионно-плазменного насыщения поликристаллов АНС азотом при 400°C было выявлено, что толщина поверхностного слоя в зернах с ориентацией $\langle 001 \rangle$ больше, чем в зернах с ориентацией $\langle 111 \rangle$. Эта зависимость была подтверждена в работе А. Martinavičius [2], выполненной на монокристаллах АНС ($T_{\text{обр.}} < 450^{\circ}\text{C}$). В связи с этим, весьма перспективным будет исследовать структуру монокристаллов АНС, обработанных методом ИПО при температурах более 450°C , когда фаза $\text{Fe-}\gamma_{\text{N,C}}$ претерпевает распад с образованием вторичных фаз, и сравнить с данными о поверхностных слоях в поликристаллах АНС после ИПО по идентичному режиму. Это сравнение позволит выявить зависимость характеристик поверхностных слоев, сформированных при температурах 550°C , от микроструктуры образцов и кристаллографической ориентации монокристаллов по отношению к насыщаемой поверхности.

Цель работы – выявить особенности микроструктуры, фазовый состав и микротвердость поверхностно-упрочненного слоя, сформированного ионно-плазменной обработкой $\langle 001 \rangle$ - и $\langle 111 \rangle$ -монокристаллов и поликристаллов аустенитной нержавеющей стали при температуре 550°C в смеси газов (азот, аргон, ацетилен).

1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1 Характеристика аустенитных хромоникелевых сталей

В последнее время существует тенденция к получению новых неметаллических композиционных материалов на основе керамик и полимеров. Но при этом наиболее востребованными по-прежнему остаются стали (металлические сплавы на основе железа с добавлением углерода). Они применяются в качестве конструкционных материалов в строительной промышленности, ядерной энергетике, нефтегазовой, аэрокосмической, химической, пищевой промышленности, а также в машиностроении, судостроении и медицине [3]. По данным World Steel Association, в декабре 2022 года в мире было произведено 140,7 млн тонн стали [4], что подтверждает востребованность сталей на мировом рынке.

Основным способом получения аустенитных нержавеющей сталей (АНС) является промышленное литье. АНС характеризуются высокой коррозионной стойкостью, свариваемостью, пластичностью, формруемостью, а также хладостойкостью и жаростойкостью. Данные стали относятся к классу высоколегированных сталей и являются устойчивыми к коррозии за счет высокого содержания хрома (не менее 10,5 %) [5-7]. Защита изделия от воздействия окружающей среды от коррозии происходит за счет формирования в присутствии кислорода самовосстанавливающихся инертных пленок [5]. АНС проявляют коррозионную стойкость и к агрессивным средам, также образуя на поверхности деталей оксидные пленки, состоящие из Cr_2O_3 , FeCr_2O_4 и других оксидов [5].

Прочностные свойства АНС отличаются в зависимости от химического состава определённой марки стали. В таблице 1 приведены характеристики пластичности и прочности, а также химический состав сталей серии AISI 300 и 400. По представленным в таблице характеристикам видно, что предел прочности снижается при уменьшении процентного содержания хрома в стали. А с уменьшением содержания кремния и углерода понижается ее предел текучести. Хромоникелевые нержавеющей стали AISI 300-й серии в зависимости от химического состава (соотношения никеля и хрома), содержания углерода и структуры, приобретенной в результате термической или термомеханической обработки, подразделяются на несколько групп, среди них аустенитные, аустенитно-мартенситные и аустенитно-ферритные (дуплексные) стали [7, 8]. К данной серии относят следующие марки: AISI 304, 310, 310S, 316, 316L, 316Ti, 321 [8]. Одним из основных легирующих элементов нержавеющей сталей серии AISI 300 является никель (Ni) (содержание в стали не менее 8 мас. %) [5]. Введение никеля в сталь обеспечивает формирование стабильной

аустенитной структуры в нержавеющей стали за счет повышения энергии дефекта упаковки (ЭДУ).

Таблица 1 – Характеристики пластичности и прочности и химический состав нескольких марок стали серий AISI 300 и 400

Характеристики при комнатной температуре	Серия AISI 300 [9]			Серия AISI 400 [10]	
	Сталь 304	Сталь 316L	Сталь 321	Сталь 410	Сталь 420
Предел текучести, МПа	310	300	280	290	375
Предел прочности, МПа	600	570	580	500	620
Относительное удлинение, %	60	60	60	30	20
Химический состав приведенных сталей (Fe ост.), %					
C	до 0,8	до 0,03	до 0,08	до 0,15	0,35-0,44
Si	до 0,8	до 1	до 1	–	до 0,6
Mn	до 0,2	до 2	до 2	до 1	до 0,6
Mo	–	2-3	–	–	–
S	до 0,02	до 0,03	до 0,03	до 0,03	до 0,025
P	до 0,035	до 0,045	до 0,045	до 0,045	до 0,03
Cu	до 0,3	–	–	–	–
Ti	до 0,5	до 0,5	до 0,5	–	–
Ni	9-11	10-14	9-12	до 0,6	до 0,6
Cr	17-19	16-18	17-19	11,5-13,5	12-14

Более привлекательной по соотношению пластичность/прочность является нержавеющая сталь марки AISI 316L (аналог в России 01X17H13M3), таблица 1. Данная сталь является низкоуглеродистым аналогом 316 стали (содержание углерода в ней должно составлять до 0,03 %) [6, 8]. Отметим, что стали AISI 316L и 316 показывают наибольшую стойкость к коррозии из всех сталей 300-й серии [6]. Незначительное содержание углерода в 316L стали снижает выделение карбидов хрома, которое обычно происходит по границам зерен (при нагревании в интервале температур от 540 до 845°C) [8]. За счет этого сталь AISI 316L (аналог 01X17H13M3) меньше поддается межкристаллитной коррозии, чем АНС 316 [8].

Основными легирующими элементами АНС AISI 316L (Fe-17Cr-13Ni-2,7Mo-1,7Mn-0,5Si-0,01C масс. %, 01X17H13M3) являются хром (Cr), никель (Ni) и молибден (Mo) [5, 8]. Легирование молибденом обеспечивает устойчивость к атмосферным воздействиям и слабую восприимчивость стали к локальной коррозии [6]. Сталь AISI 316L относится к аустенитному классу из-за термической стабильности ее аустенитной структуры [8]. После термической обработки (гомогенизации) при 1100°C АНС 316L имеет однофазную однородную поликристаллическую структуру с гранцентрированной кубической (ГЦК) решеткой [6]. Сталь AISI 316L не лишена недостатков: как и большинству АНС ей

свойственны низкие прочностные характеристики и износостойкость. Это в той или иной мере устраняется проведением деформационной обработки (прокатка, штамповка, прессование и т.д.) [11], легированием различными элементами (хром, никель, кремний, кобальт и т.д.) [12], в том числе и тугоплавкими (вольфрам, молибден, титан и т.д.) [13]; применением термомеханической обработки (ТМО) и химико-термической обработки (ХТО). Эффективно повысить износостойкость и поверхностную твердость АНС возможно при модификации структуры и фазового состава поверхности с помощью ионно-плазменного насыщения деталей и элементов конструкции атомами внедрения.

1.2 Влияние химико-термической обработки в среде газа и плазмы на свойства аустенитных нержавеющей сталей

Применение специальных высоколегированных сплавов с высокими значениями твердости, износо- и коррозионностойкости наиболее актуально для изготовления деталей механизмов и машин, работающих в агрессивных средах, и там, где наблюдается повышенный износ материала. Но такие детали значительно повышают стоимость всего изделия. Этого можно избежать, выбрав более дешевые низколегированные стали для производства деталей с последующим применением к ним упрочняющих термообработок. В случае, когда термообработка не дает желаемого результата, применяются специальные покрытия и/или химико-термическая обработка. Данные обработки позволяют повысить твердость и износостойкость обрабатываемой детали [14]. ХТО обычно проводится в газовой среде или с применением ионно-плазменных технологий. При химико-термической обработке в газовой среде происходит насыщение нагретой поверхности детали атомами внедрения: азотом (азотирование), углеродом (цементация), бором (борирование), кадмием (кадмирование), одновременно азотом и углеродом (нитроцементация) и так далее [14].

При плазменной ХТО обрабатываемая деталь находится в плазме газа, содержащей определенные химические элементы. Ионы этих элементов ускоряются под воздействием электрического поля и внедряются в поверхность детали [14, 15]. Независимо от типа обработки, насыщение атомами внедрения происходит за счет термоактивной диффузии на границе раздела между насыщающей средой и поверхностью обрабатываемой детали. Ионы приобретают энергию в тысячи раз больше, чем при обработке в газовой среде, несмотря на небольшую разницу потенциалов между плазмой и поверхностью детали [15]. Стоит отметить преимущества ХТО в плазме: хорошая воспроизводимость результатов, точный контроль формируемых поверхностных свойств, экологичность и экономическая выгода такой обработки [14, 15].

Наибольшее распространение среди методов ионно-плазменной обработки получило ионно-плазменное азотирование, в результате которого повышается твердость, улучшаются трибологические свойства и усталостная выносливость, а также износостойкость, теплостойкость, коррозионная стойкость металлов и сплавов [14]. Модификация поверхности изделия при ИПО в среде, содержащей азот, происходит за счет ее бомбардировки ионами азота из плазмы и последующего внедрения и диффузии атомов вглубь детали [14]. Далее происходит увеличение толщины модифицированного слоя, что реализуется за счет дальнейшего поддерживаемого ИПО насыщения поверхности атомами азота. Первый закон Фика, количественно описывающий процесс диффузии, показывает, что поток вещества в направлении оси x пропорционален градиенту концентрации диффундирующего вещества.

$$J = -D \frac{dC}{dx}, \quad (1)$$

где D – коэффициент диффузии;

J – поток вещества;

dC/dx – градиент концентрации [3].

При этом коэффициент диффузии (D) зависит от температуры и подвижности вещества в среде [3]:

$$D = RTu, \quad (2)$$

где R – газовая постоянная;

T – температура;

u – подвижность вещества [3].

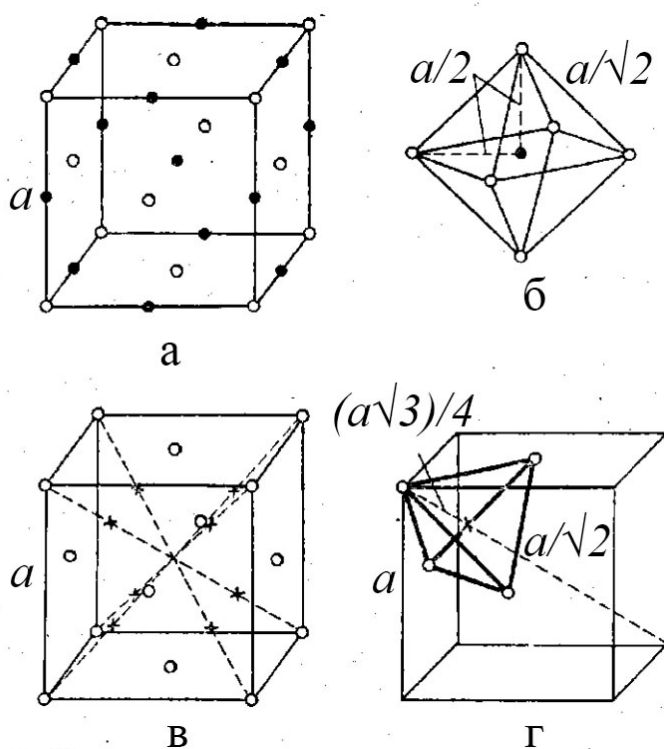
Так как коэффициент диффузии не постоянный, а зависимый параметр, то температура обработки, длительность процесса, рабочее давление, состав газовой среды, основные параметры разряда, создающего плазму, и т.д. могут оказывать значительное влияние на толщину, твердость, коррозионную стойкость, фазовый состав и трибологические свойства формируемых при ионно-плазменной обработке упрочненных слоев.

1.3 Положение атомов внедрения в ГЦК кристаллической решетке

Атомы внедрения могут занимать в кристаллической решетке положения между узлами – в междоузлиях, которые отличаются размером, количеством и расположением окружающих их узлов [16]. Вокруг междоузлия может быть выделен многогранник, ребра которого соединяют соседние с междоузлем узлы. Таким образом, разные типы междоузлий могут иметь различные по объему и форме многогранники, описывающие их,

а также могут отличаться ориентацией в пространстве относительно основной кристаллической решетки. С помощью этих многогранников характеризуют в геометрическом отношении те пустоты или поры, в которых может находиться атом внедрения [16]. Сравнение объема данного многогранника и атомного объема атома внедрения позволяет сделать выводы о наиболее вероятных типах междоузлий для определенных атомов.

В ГЦК, ОЦК и ГПУ решетках можно выделить два основных типа междоузлий: октаэдрические и тетраэдрические [16]. Расположение основных типов междоузлий (октаэдрические и тетраэдрические) в ГЦК решетке показано на рисунке 1. Из предложенной схемы видно, что октаэдрическое междоузлие окружено шестью соседними атомами металла, а тетраэдрическое – четырьмя [16]. Октаэдрические междоузлия в ГЦК решетке расположены в центрах кубических ячеек и в середине ребер. Тетраэдрические междоузлия расположены на пространственных диагоналях кубической ячейки посередине между ее центром и вершинами. Важно отметить, что междоузлия имеют разную форму в различных решетках [16].



- a – постоянная решетки, \circ – атомы металла, \bullet – октаэдрические междоузлия,
 \times – тетраэдрические междоузлия;
 a – расположение октаэдрических междоузлий в кубической решетке;
 $б$ – атомы металла, соседствующие с октаэдрическими междоузлиями;
 $в$ – расположение тетраэдрических междоузлий в кубической ячейке;
 $г$ – атомы металла, соседние с тетраэдрическим междоузлиями;

Рисунок 1 – Междоузлия в ГЦК решетке [16]

В ГЦК решетке октаэдр правильный и все соседние узлы решетки находятся от его центра на одинаковых расстояниях, равных $a/2$ (a – параметр решетки ГЦК кристалла). Данные для более точного описания междоузлий в ГЦК решетке представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Общие сведения о междоузлиях в ГЦК решетке [16]

	Октаэдрические междоузлия	Тетраэдрические междоузлия
Число междоузлий, приходящихся на атом металла	1	2
Расстояние от центра междоузлия до соседних узлов	$a/2$ (6 узлов)	$a\sqrt{3}/4$ (4 узла)
Длина ребер многогранника (октаэдра/тетраэдра), построенного около междоузлия	$a/\sqrt{2}$ (12 ребер)	$a/\sqrt{2}$ (6 ребер)
Радиус сферы, вписанной в междоузлие (в модели жестких шаров радиуса r_a)	$0,41r_a$	$0,22 r_a$
a – длина ребра кубической ячейки.		

В упорядоченных сплавах междоузлия, даже геометрически однотипные (к примеру, октаэдрические), могут быть неэквивалентными из-за различного окружения их атомами разных типов. Это может привести к тому, что внедренные атомы в таких междоузлиях будут иметь различную энергию взаимодействия с атомами металлов, замещающих узлы решетки, и вызвать, в среднем, неравномерное распределение атомов внедрения по таким междоузлиям. Неэквивалентность междоузлий могут вызвать также внутренние или внешние напряжения, изменяющие объем или форму соответствующих октаэдров и тетраэдров [16].

1.4 Изменение фазового состава и свойств поверхностных слоев аустенитной нержавеющей стали при ионно-плазменном азотировании

Обычно для проведения азотирования аустенитных сталей используют температуры в интервале 600-1200°C, что приводит к резкому снижению коррозионных свойств поверхностных модифицированных слоев за счет выделения нитридов хрома и обеднения окружающих их объемов по Cr. В связи с этим прибегают к низкотемпературному ($T < 600^\circ\text{C}$) азотированию. При этом после ИПО при температуре $T < 450^\circ\text{C}$, модифицированный поверхностный слой в стали состоит из метастабильной фазы, известной как пересыщенный азотом аустенит (S-фаза), обладающей твердостью и коррозионной стойкостью выше, чем у исходной стали [6].

В литературном обзоре [17] указано, что положительные эффекты низкотемпературного ионно-плазменного азотирования и возможности получения в

аустенитных нержавеющей сталей S-фазы были установлены в середине 1980х годов в независимых исследованиях Ichii и др. [18] и Zhang Z.L. и Bell T. [19]. В 1983 году Zhang Z.L. и Bell T. представили исследование, в котором утверждали, что «низкотемпературное плазменное азотирование при $T = 400^{\circ}\text{C}$ может привести к образованию азотированного слоя, который имеет коррозионные свойства, эквивалентные исходному материалу» [19]. Авторы статьи [19] выявили, что плазменное азотирование при 400°C приводит к образованию поверхностного слоя без частиц CrN, который, по предположению авторов, состоит из γ' -Fe₄N фазы и аустенита. Первые исследования Ichii и соавторов были опубликованы в 1985 году на японском языке. Было показано, что ионно-плазменное азотирование стали SUS 304 (аналог AISI 304) при $T = 400^{\circ}\text{C}$ приводит к формированию поверхностного слоя, состоящего из γ' -M₄N (M = Fe, Cr, Ni...) фазы. Позднее, в англоязычной статье этих же авторов [18] было показано, что на рентгеновских дифрактограммах для образцов стали SUS 304, азотированных в плазме при 400°C , помимо пиков исходного аустенита, присутствовали пять дополнительных пиков, которые были смещены в сторону меньших углов дифракции по отношению к пикам аустенита. Эти смещенные пики, названные S1 – S5, не были проиндексированы в системе ASTM (American Society for Testing and Materials – Американское международное сообщество по испытаниям и материалам), поэтому авторы указали эти пики как новую фазу, обозначив их «S-фазой». В том же году Yasumaru N. и Kamachi K. провели похожее исследование [20]. После азотирования в тлеющем разряде стали AISI 304 при $T = 350^{\circ}\text{C}$ авторы обнаружили аналогичные пики на рентгеновских дифрактограммах и предположили, что смещенные пики могут принадлежать нитриду с гранцентрированной тетрагональной кристаллической решеткой. Повышение твердости и коррозионной стойкости материалов при формировании S-фазы в поверхностном слое в дальнейшем дало основание для множества исследований направленных на разработку способов формирования, определение характеристик и свойств модифицированных поверхностных слоев, полученных при низкотемпературной ИПО. Таким образом, были показаны зависимости толщины слоя S-фазы от параметров ИПО: температуры азотирования, времени насыщения, состава насыщающего газа, давления в рабочей камере, а также способа получения плазмы [8, 21-29].

Важно отметить, что в работе [29] было показано, что формирование модифицированного поверхностного слоя, содержащего S-фазу, изменяет морфологию поверхности АНС, рисунок 2. На изображении наблюдаются полосы, похожие на линии скольжения, различная шероховатость поверхности, зависящая от кристаллографической ориентации зерен.

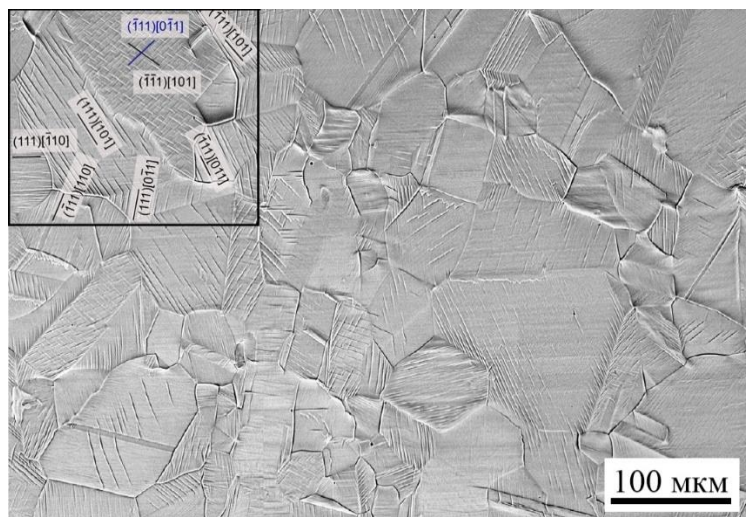


Рисунок 2 – Изображение морфологии поверхности азотированного в плазме при 400°C (3 ч) стального образца AISI 316L, полученное методом СЭМ [29]

Если концентрация внедренного азота в аустените немного выше предельной (11,35% по массе) это вызывает большое уширение кристаллической решетки в азотированных зернах. Из-за этого морфология зерен на поверхности образца остается близкой к исходной, но возникают высокие внутренние напряжения, приводящие к локальному пластическому деформированию обработанной поверхности стали [17]. В зависимости от кристаллографической ориентации полосы скольжения пересекают зерна в различных направлениях. Границы зерен приобретают рельеф как вследствие увеличения объема зерен из-за искажения кристаллической решетки («набухание» зерен), или же относительной разориентировки зерен относительно друг друга. Пластическая деформация в направлении перпендикулярном к азотированной поверхности, зависит от ориентации зерен и, с учетом «набухания» зерен по сравнению с толщиной азотированного слоя, достигает значений до 20% [30]. Данное изменение объема материала получено в результате уширения кристаллической решетки за счет внедрения азота (уширение решетки около 9%; на поверхности концентрация N ~ 33 ат. %, с учетом изменения параметра решетки [30]), упругой деформации, возникающей из-за остаточных напряжений в плоскости, и пластической деформации. Причем пластическая деформация происходит по достижении критического значения напряжений сдвига, которая напрямую связана с критической концентрацией внедренных атомов азота. Stinville и соавторы [30] предположили, что пластическая деформация начинается вблизи фронта азотирования, где концентрация азота увеличивается от 0 до 15 ат.%, а уже после распространяется в азотированном слое с движением фронта азотирования.

При помощи EBSD-анализа поликристаллических образцов, подвергнутых плазменному азотированию [30], было показано, что происходит вращение кристаллической решетки в области азотированных зерен. Из-за пластической анизотропии ГЦК-решетки и взаимодействия с соседними зернами, в поликристаллических образцах амплитуда угла поворота каждого зерна и его направление зависят от ориентации зерна до азотирования и концентрации азота в нем после обработки [25]. В целом, текстура имеет тенденцию эволюционировать в сторону $\langle 001 \rangle$ и/или $\langle 111 \rangle$ ориентаций [30].

Возникновение пластических деформаций, «набуханий» и «вращения» зерен влияет на шероховатость поверхности образцов. Также на ее шероховатость влияет ионная бомбардировка, т.к. происходит плазменное травление обрабатываемой поверхности [31, 32].

Вышеизложенные изменения в структуре и фазовом составе азотированной стали приводят к значительному увеличению микротвердости поверхностных слоев по сравнению с исходными значениями. По мере того, как увеличивается содержание S-фазы и толщина модифицированного слоя, отмечаются более высокие значения микротвердости поверхности. Также на повышение значений микротвердости поверхностных азотированных слоев оказывают влияние микронапряжения, возникшие вследствие увеличения параметра кристаллической решетки при азотировании. В работах [21-26, 28, 33, 34] показана тенденция к повышению поверхностной микротвердости азотированной стали при образовании в упрочненных слоях S-фазы, что связано с расширением ГЦК решетки при ее насыщении атомами азота.

Трибологические свойства АНС повышаются за счет образования упрочненных поверхностных слоев при низкотемпературной обработке [5]. Причем износостойкость поверхностных слоев зависит от твердости и микронапряжений в модифицированном слое. В ряде работ исследован износ азотированных [35-37], науглероженных [35, 36, 38] и нитроцементованных [36] слоев в АНС в различных условиях испытаний – в условиях сухого трения или со смазкой. Так, в работе [37] испытания проводились на образцах стали AISI 316, азотированных в плазме при температурах 450°C, 500°C, 550°C, с использованием различных стационарных ползунов (глинозем и шарики подшипниковой стали) и нагрузок (10–50 Н) в условиях сухого трения или в присутствии коррозионного раствора (HCl 10% + HNO₃ 5% + H₂O 85%). Отметим, что в результате азотирования при T = 450°C поверхностный слой преимущественно состоял из S-фазы. Увеличение температуры до T = 500°C приводит к снижению содержания S-фазы, а при T = 550°C формирование данной фазы не происходит. Результаты исследований показали, что для всех азотированных образцов имеет место увеличение износостойкости в сравнении с

необработанными образцами, а также, что характеристики износа зависят от вида трибосистемы и кристаллической структуры образца [37]. При этом в работе отмечено, что, изменение текстуры азотированной поверхности, вызванное изменением ее морфологии, также может иметь положительный эффект на приобретенные трибологические свойства [37].

S-фаза может обладать ферромагнитными свойствами. Причем, впервые эти сведения относительно модифицированных слоев, полученных в результате низкотемпературного азотирования, появились в работе Ichii и соавторов [18]. Williamson и др. [39] проанализировали нержавеющую сталь AISI 304, легированную азотом, с помощью CEMS (Conversion electron Mössbauer spectroscopy – конверсионная электронная мессбауэровская спектроскопия) и наблюдали изменение магнитной природы S-фазы по мере увеличения содержания азота и параметра решетки. Происходил переход от парамагнитной фазы, когда S-фаза обладала низким содержанием азота, до ферромагнитной фазы, когда содержание азота в S-фазе составляло около 20 ат. % [39].

Авторы [40, 41], используя изотермический отжиг азотированных или науглероженных образцов, исследовали термическую стабильность S-фазы и ее распад. Так, в работе [40], на образцах AISI 316 отожженных при 100-600°C в течение 3000 ч, показано, что S-фаза имеет тенденцию к распаду с дальнейшим образованием CrN и Fe- α , в то время как фаза с ГЦК кристаллической решеткой постепенно истощается по азоту. После чего была выдвинута гипотеза о том, что для полного распада S-фазы при температурах 300°C и ниже необходимы годы. Аналогичный результат был получен T. Christiansen и M.A.J. Somers [41], но они указали, что температура и время превращения также зависят от состава обрабатываемого сплава. При изучении кинетики распада азотированных образцов AISI 304L и AISI 316L (430°C, 28 ч) путем изотермического отжига при T = 30-900°C в инертной (N₂) и восстановительной (H₂) атмосферах, авторы показали, что азотированная сталь AISI 316L более устойчива к распаду, чем AISI 304L. В восстановительной атмосфере S-фаза в стали AISI 304L распадается на Fe- α и CrN, в то время как для AISI 316L образуется Fe- γ и CrN.

Существующие результаты исследований термической стабильности S-фазы, насыщенной углеродом в образцах стали AISI 316, науглероженных при 450°C в течение 20 часов, показали, что температура, при которой происходит распад, составляет 350°C. Эта температура выше, чем для распада S-фазы в азотированных образцах [42]. Карбид Хегга χ -M₅C₂ и фаза M₇C₃ образуются в модифицированной поверхности с S-фазой с содержанием углерода 10,7 ат. % после длительного науглероживания при 475°C в течение 44 часов [43]. Исследование науглероженной в газовой среде фольги и стального

порошка AISI 316 в диапазоне температур 380-470°C показало, что независимо от температуры обработки образование карбида Хегга в S-фазе происходит при содержании углерода в S-фазе выше предела растворимости (19 ат. %) [44]. Образование фаз χ -M₅C₂ до M₇C₃ происходит при продолжении науглероживания или выдержке образцов при температурах выше 600°C [44].

На основе рассмотренных экспериментальных данных можно предположить, что слои S-фазы обладают долговременной стабильностью (более 10 лет) при температуре эксплуатации ниже 200°C [40-42].

При азотировании в плазме при температурах выше $T > 450^\circ\text{C}$ S-фаза претерпевает распад. Чаще всего в поверхностном слое образуется нитрид хрома CrN и α -Fe (либо нитриды железа и хрома), что влечет за собой изменение свойств азотированного слоя [5]. Элементный состав модифицированных слоев напрямую зависит от легирующих элементов, содержащихся в стали, и от насыщающей среды. В аустенитных нержавеющей сталях фазовые превращения в поверхностном азотированном слое происходят с различной интенсивностью, которая зависит от химического состава стали и температуры ИПО.

Повышение температуры ионно-плазменного азотирования более 500°C приводит к формированию композиционного гетерофазного слоя в аустенитной нержавеющей стали. Происходит образование фаз FeN, Fe₄N, Fe₂₋₃N и CrN при условии насыщения обрабатываемой поверхности атомами азота [7, 8, 21-28, 33, 34]. При этом наблюдается повышение микротвердости и значительное увеличение толщины азотированных слоев, а также плавное снижение концентрации атомов внедрения от обрабатываемой поверхности к матрице образца, т.е. формирование диффузионной зоны [7, 8, 25, 28]. В частности, в композиционном слое [28], полученном в результате азотирования стали AISI 202 в плазме при 500°C, помимо фаз CrN, ϵ -M₂₋₃N, γ' -M₄N присутствовала S-фаза.

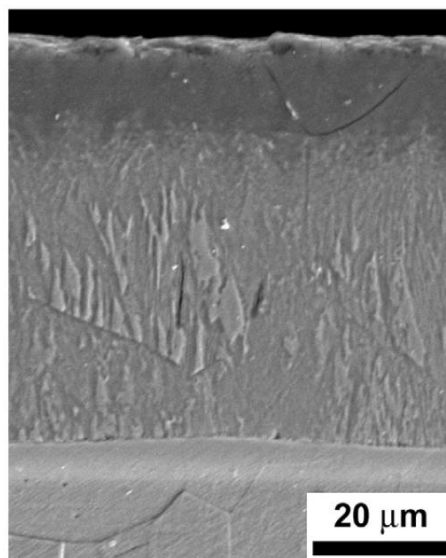


Рисунок 3 – Микрофотография поперечного сечения образца AISI 202 с модифицированным слоем, подвергнутого ИПО при 500°C, полученная методом СЭМ [28]

На рисунке 3 показано изображение поперечного сечения образца AISI 202 после ИПО при 500°C, полученное методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) [28]. Насыщение привело к формированию упрочненного слоя толщиной ~ 60 мкм и диффузионной зоны ~ 20 мкм. Такая протяженная диффузионная зона позволяет предотвратить скалывание модифицированного слоя в процессе эксплуатации детали, обработанной по заданному режиму азотирования.

Рисунок 4, на котором представлены профили распределения микротвердости по глубине образца стали AISI 202, обработанного при различных температурах, приведен для более подробного представления о распределении микротвердости в образце, азотированном при разных температурах [28].

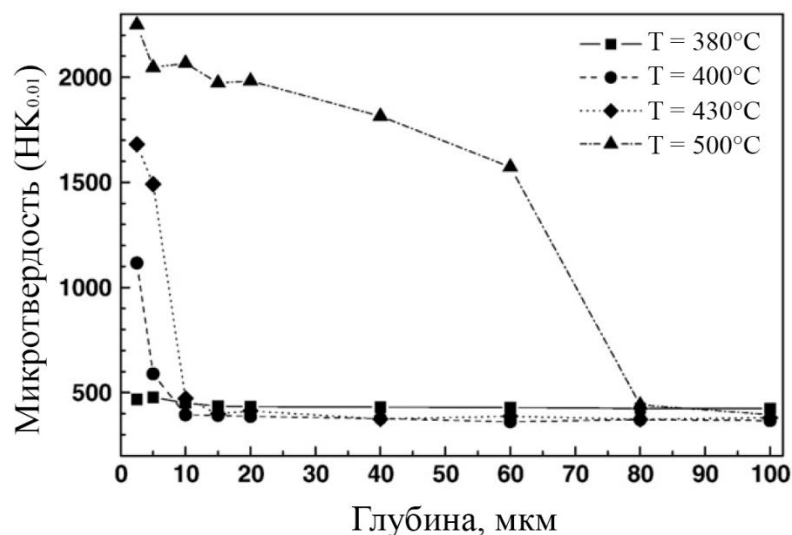
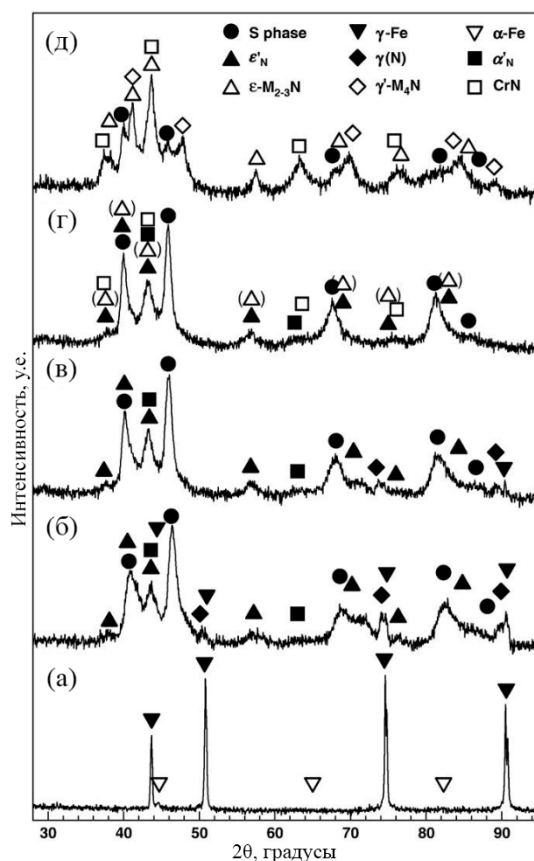


Рисунок 4 – Профили распределения микротвердости по Кнупу образцов AISI 202 при различных температурах азотирования [28]

Недостатком композиционных слоев является понижение коррозионной стойкости по сравнению со значениями для слоя S-фазы [25, 28]. F. Borgioli и др. [28] провели исследование коррозионных свойств стали AISI 202 и в 5%-ном азотированном растворе NaCl потенциодинамическим методом. Все образцы, независимо от режима ИПО, подвержены локальной коррозии, но степень их повреждения зависит от условий обработки. Так, ионно-плазменная обработка в тлеющем разряде до $T = 450^{\circ}\text{C}$ приводит к повышению стойкости образцов к точечной коррозии по сравнению со значениями для исходных образцов. После азотирования при $T = 500^{\circ}\text{C}$ наблюдается меньшая коррозионная стойкость, вызванная образованием значительного количества нитридов в поверхностных слоях стальных образцов. На рисунке 5 представлены результаты рентгенофазового анализа образцов стали AISI 202, подвергнутых ионно-плазменной обработке при температурах $380\text{-}500^{\circ}\text{C}$ [28].



а – исходный фазовый состав; б – азотирование при 380°С,
 в – азотирование при 400°С, г – азотирование при 430°С,
 д – азотирование при 500°С

Рисунок 5 – Рентгенограммы образцов AISI 202 до и после азотирования при различных температурах [19]

В композиционном слое, сформированном при 500°С, происходит снижение интенсивности пиков от S-фазы на рентгенограмме. Отметим, что S-фаза присутствует в составе упроченных слоев независимо от режима ионно-плазменного насыщения [28].

1.5 Монокристаллы

Природные и синтетические твердые тела в большинстве случаев состоят из множества отдельных кристаллитов. Каждый такой кристаллит в большей или меньшей степени разориентирован относительно соседних кристаллитов. Таким образом, твердые тела, по большей части, представляют из себя поликристаллы. Монокристалл представляет из себя кристалл, в котором нет макроскопических областей, разориентированных одна относительно другой более чем на несколько градусов [45, 46]. Внешняя форма монокристалла зависит от атомно-кристаллической структуры и от условий кристаллизации. Получением металлических монокристаллов занимались на протяжении всего XX века, но до 50-х годов этим занимались лишь отдельные исследователи (химики,

металлурги, физики). С середины XX века возрастает интерес к металлическим монокристаллам как к потенциальной основе новых конструкционных и функциональных материалов [45, 46]. В связи с этим активно разрабатываются методы и технологии, обеспечивающие увеличение производительности процесса, совершенство выращиваемых монокристаллов, получение кристаллов заданного профиля [45, 46]. Появляются различные потребители металлических монокристаллов: СВЧ-электроника, приборостроение для систем управления, атомная энергетика [45, 46].

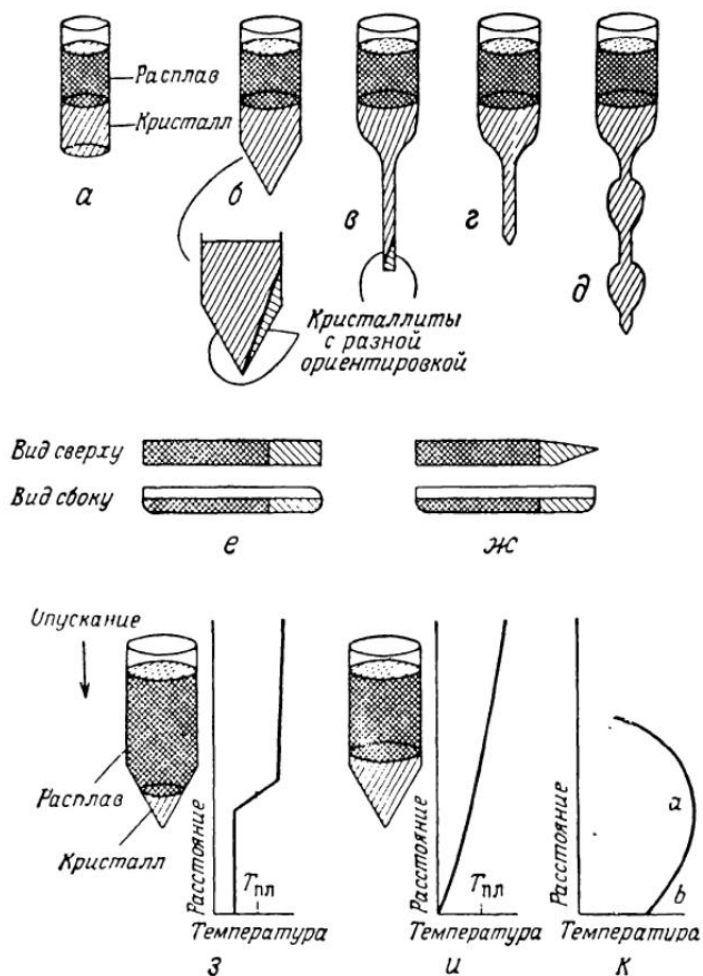
1.6 Методы получения монокристаллов

Выращивание монокристаллов можно осуществить различными методами: кристаллизацией из расплава, кристаллизацией из раствора или же кристаллизацией из газовой фазы. Для выбора метода кристаллизации монокристалла необходимо рассматривать несколько факторов. Первым делом обращают внимание на природу кристаллизуемого вещества (температуру плавления, наличие фазовых переходов, химическую активность и т.д.). Также учитываются технические и экономические показатели метода и требования к реальной структуре, геометрической конфигурации и размерам получаемого монокристалла [45-47]. В данной работе монокристаллы были выращены при помощи метода Бриджмена (метод направленной кристаллизации), в связи с чем данный метод будет рассмотрен более детально. Суть метода Бриджмена состоит в том, чтобы создать зародыши на единственной границе между расплавом и кристаллом и проводить кристаллизацию в поле температурного градиента [45-47]. Кристаллизуемый материал обычно находится в цилиндрическом тигле, который опускают через поле температурного градиента, рисунок б з, или же нагреватель поднимают вдоль тигля. Иногда тигель неподвижно закрепляют в печи, сконструированной так, что температурный градиент в ней близок к постоянному, после чего дают печи остыть, рисунок б и [46]. Естественно, что в печи существует зона с почти постоянным градиентом, кривая ab на рисунке б к, как это требуется при выращивании посредством охлаждения [46]. В обоих случаях изотерму, перпендикулярную оси тигля, перемещают через него достаточно медленно, чтобы сплав успевал следовать за ней [46]. Как правило, в начале процесса выращивания все содержимое тигля расплавляется и при первом зарождении образуется несколько кристалликов [46]. Превалирование на границе раздела кристалл-расплав одного из таких кристаллов обеспечивается способами, которые будут перечислены далее.

Дно тигля делают коническим, рисунок б б, так что первоначально переохлаждается только малый объем расплава. Таким образом образуется только один зародыш. Если же

произойдет формирование двух зародышей, то один из них, обладающий наиболее благоприятной ориентацией, станет доминировать на всей границе раздела [46].

Также можно изготовить тигель с капиллярным концом, рисунок 6 в. В данной ситуации расплав первоначально переохлаждается в очень маленьком объеме. В случае возникновения в капилляре нескольких кристаллитов, ситуация будет аналогичной с коническим тиглем [46].



а, б – цилиндрический тигель с кристаллизующим материалом;
Рисунок 6 – Формы тиглей и лодочек, используемых при выращивании кристаллов методом Бриджмена [46]

Можно соединить конец конического тигля с основным объемом тигля тонким капилляром, рисунок 6 г. Данный метод соединяет в себе преимущества двух первых способов [46]. Еще один способ получения монокристаллов заключается в следующем: на конце тигля конической формы, рисунок 6 д, предусматривают одно-два расширения, которые соединяются друг с другом и с тиглем капиллярами. Такая конструкция тигля обеспечивает первоначальное зарождение в очень малом объеме и способствует отбору

монокристаллического участка из расширения в качестве затравки при прорастании через капилляр [46].

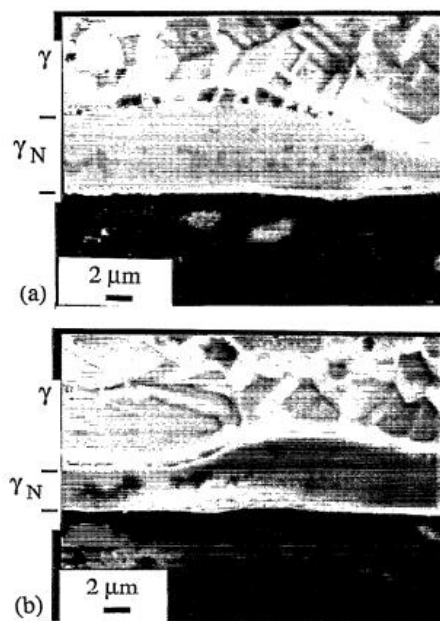
Вышеперечисленные конфигурации, рисунок б а-д, могут быть использованы и при выращивании в открытых лодочках, рисунок б е-ж. В таком случае пользуются горизонтальными, а не вертикальными печами.

1.7 Ориентационная зависимость параметров поверхностях слоев, сформированных при ионно-плазменном насыщении атомами внедрения моно- и поликристаллических образцов аустенитной нержавеющей стали

В работах [1, 2, 47] авторы отмечают, что при ионно-плазменном насыщении атомами внедрения аустенитных зерен с различными кристаллографическими ориентациями наблюдается изменение толщины поверхностного слоя и концентрации атомов внедрения.

Так, в работе [1] описаны результаты ионно-плазменного насыщения ($T = 400^{\circ}\text{C}$) поликристаллических образцов АНС AISI 304, где средний размер зерна составлял 50 мкм. В результате насыщения были сформированы поверхностные слои, состоящие из пересыщенного азотом аустенита. Авторы работы отметили, что толщина слоя изменяется при переходе от одного зерна к другому, что было продемонстрировано на СЭМ-изображении поперечного сечения образца после насыщения, рисунок 7. Также при помощи анализа дифракции рентгеновского излучения было выявлено, что содержание и глубина имплантации азота зависит от кристаллографической ориентации зерна. Было показано, что азот диффундирует глубже в зернах с ориентацией $\langle 200 \rangle$ по сравнению с зернами $\langle 111 \rangle$ [1]. Более глубокое проникновение азота в направлении $\langle 100 \rangle$ также подтверждается тщательным изучением шероховатости поверхности [1].

А. Martinavičius и соавторы [2] провели ИПО монокристаллических образцов АНС AISI 316L с ориентациями $\langle 001 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ при температурах 370-430 $^{\circ}\text{C}$. В ходе исследования было выявлено, что глубина проникновения азота сильно увеличивается при повышении температуры обработки. Но при этом ещё существует явная зависимость от ориентации кристалла: глубина проникновения увеличивается в последовательности $\langle 111 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ и $\langle 001 \rangle$ при фиксированной температуре ИПО [2]. Авторы отмечают, что в связи с увеличением коэффициента диффузии в последовательности ориентаций $\langle 111 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ и $\langle 001 \rangle$ также наблюдается увеличение протяженности поверхностного модифицированного слоя.



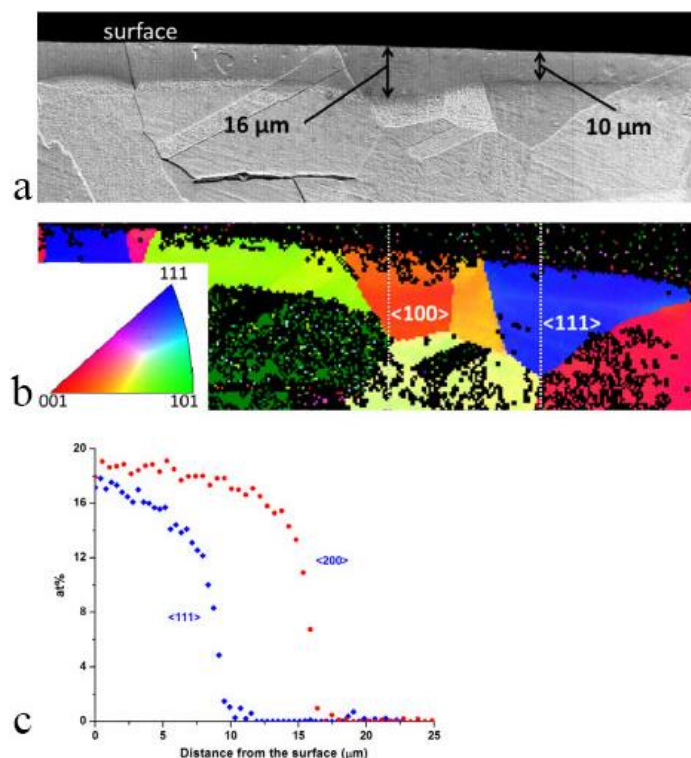
N – азот; γ_N – пересыщенный азотом аустенит, формирующий поверхностный слой; γ – исходный аустенит, матрица образца.

Рисунок 7 – СЭМ-изображения поперечного сечения стального образца после ИПО (1кВ, 125 минут). Кадры, сделанные вдоль слоя насыщенного азотом на расстоянии нескольких зерен друг от друга, показывают значительные изменения толщины слоя в разных зернах

[1]

D. Wu и соавторы исследовали [47] ориентационную зависимость насыщения азотом в аустенитной нержавеющей стали при низкотемпературном газофазном азотировании. В работе [47] поликристаллические образцы стали 316L азотировали по 11-ти различным режимам при температурах 350-450°C, изменяя активность азота и время обработки (5, 20, 80 часов). На рисунке 8 а представлены СЭМ-изображения поперечного сечения образца, азотированного в течение 80 часов при $T = 440^\circ\text{C}$. Глубина насыщения у различно ориентированных зерен отличается [47]. Так, ДОЭ-изображение той же области на рисунке 8 b показывает наибольшую глубину насыщения в зернах, нормаль к поверхности которых параллельна направлению $\langle 100 \rangle$.

Наименьшая глубина насыщения наблюдается для зерен с ориентацией $\langle 111 \rangle$. На рисунке 8 с представлены профили концентрации азота по глубине образца для отмеченных зерен на рисунке 8 b. Для зерна с ориентацией $\langle 100 \rangle$ увеличивается как глубина слоя, так и поверхностная концентрация азота [47]. Изменение поверхностной концентрации азота, наблюдаемое на рисунке 8 с – с 18 ат. % до 19 ат. % – коррелирует с 70% увеличением глубины слоя, наблюдаемым на рисунке 8 а. Форма профилей диффузии такова, что небольшое изменение поверхностной концентрации вызывает большое изменение толщины азотированного слоя [47].



Surface – поверхность; distance from the surface (μm) – расстояние от поверхности (мкм) [47];

а – СЭМ- изображение поперечного сечения азотированного образца;

б – EBSD-изображение азотированного образца с вставкой, которая является цветовым ключом к ориентации зерен по отношению к исходной поверхности образца; с – глубинные профили концентрации азота;

Рисунок 8 – СЭМ-изображение поперечного сечения, EBSD-изображение азотированного образца стали 316L и глубинные профили концентрации азота [47]

В работах, где рассматривается ориентационная зависимость толщины слоя в АНС после ИПО, насыщение атомами внедрения происходит при температурах образования S-фазы, что может быть обусловлено ее высокой коррозионной стойкостью и твердостью. Данные об ориентационной зависимости гетерофазных слоев, сформированных при температурах распада S-фазы, в литературе не встречаются. В связи с этим возникает интерес к исследованиям, которые позволят выявить ориентационную зависимость толщины поверхностного слоя и, вероятно, фазового состава в образцах, подвергнутых ИПО при температуре 550°C .

2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1 Постановка задач исследования

Ионно-плазменная обработка является перспективным методом повышения эксплуатационных свойств АНС за счет формирования поверхностных слоев с высокой коррозионной стойкостью, поверхностной твердостью и износостойкостью. Фазовый состав и толщина поверхностных слоев зависят от температуры, состава и давления рабочего газа и других параметров обработки. Так же наблюдается зависимость толщины поверхностного слоя от кристаллографической ориентации зерна по отношению к насыщаемой поверхности.

Авторы [1, 2, 47] показали наличие ориентационной зависимости параметров поверхностных слоев, полученных в ходе ионно-плазменного насыщения атомами внедрения, в зернах АНС с различной кристаллографической ориентацией к обрабатываемой поверхности. Ионно-плазменная обработка в работах [1, 2, 47] проводилась при $T = 350-450^{\circ}\text{C}$, что способствует формированию однофазных поверхностных слоев, состоящих из легированного азотом аустенита (S-фаза). В литературе данных об ориентационной зависимости параметров гетерофазных слоев нет. В связи с этим необходимо рассмотреть влияние кристаллографической ориентации на параметры гетерофазных поверхностных слоев, сформированных в аустенитной нержавеющей стали после ИПО при температурах более 450°C .

Цель работы – выявить особенности микроструктуры, фазовый состав и микротвердость поверхностно-упрочненного слоя, сформированного ионно-плазменной обработкой $\langle 001 \rangle$ - и $\langle 111 \rangle$ -монокристаллов и поликристаллов аустенитной нержавеющей стали при температуре 550°C в смеси газов (азот, аргон, ацетилен).

Для достижения заданной цели поставлены следующие задачи исследования:

1. Провести измерение микротвердости в поперечном сечении $\langle 001 \rangle$ -, $\langle 111 \rangle$ -монокристаллов и в поликристалле АНС, подвергнутых ионно-плазменной обработке.
2. Получить изображения микроструктуры и определить протяженность поверхностно-упрочненной области в исследуемых образцах.
3. Выявить элементный и фазовый состав моно- и поликристаллических образцов аустенитной нержавеющей стали после проведения ионно-плазменного насыщения.

4. Установить влияние кристаллографической ориентации монокристаллов аустенитной нержавеющей стали на толщину, микротвердость и фазовый состав формируемого в процессе ионно-плазменного насыщения поверхностного слоя.

2.2 Материал и методы исследования

Объектами исследования в данной работе были выбраны моно- и поликристаллические образцы аустенитной нержавеющей стали. Монокристаллы имеют кристаллографические ориентации $\langle 001 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ вдоль нормали к обрабатываемой поверхности. Химический состав моно- и поликристаллических образцов приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Химический состав моно- и поликристаллов аустенитной нержавеющей стали, исследуемых в работе

Легирующие элементы	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	C
Монокристаллы, вес. %	Ост.	18,6	16,8	-	0,07	0,07	0,001
Поликристаллы, вес. %	Ост.	16,8	13,3	2,7	1,7	0,6	0,01

При помощи метода Бриджмена была получена монокристаллическая заготовка АНС. Далее была произведена резка заготовки на образцы с кристаллографическими ориентациями $\langle 001 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ вдоль нормали к поверхности образца. После чего образцы отжигали при температуре $T = 1100^\circ\text{C}$ с последующей закалкой в воду. Поликристаллические образцы были прокатаны при комнатной температуре до степени осадки $\epsilon \approx 40\%$ с последующим отжигом при $T = 1050^\circ\text{C}$ и охлаждением в воду. Полученные заготовки шлифовали, а затем электролитически полировали в пересыщенном растворе ангидрида хрома (CrO_3) в ортофосфорной кислоте (H_3PO_4). Кристаллографическая ориентация монокристаллов и размер зерна поликристаллов уточнялась с помощью методов дифракции обратнорассеянных электронов (ДОЭ, сканирующий электронной микроскоп Quanta 600 FEG).

Все подготовленные образцы подвергали ионно-плазменному насыщению в плазме тлеющего разряда при температуре 550°C в течение 12 часов в среде $70\% \text{Ar} + 25\% \text{N}_2 + 5\% \text{C}_2\text{H}_2$. ИПО проводили на модернизированной установке ЭЛУ-5 при давлении в рабочей камере 300 Па. После ИПО образцы охлаждали в вакуумной камере.

Для определения толщины упрочненных слоев все образцы после ИПО были разрезаны перпендикулярно обработанной поверхности, механически отшлифованы и

отполированы на мелкодисперсных пастах. Предварительный анализ поперечных сечений моно- и поликристаллических образцов проводили на световом микроскопе Altami MET 1С. Анализ поверхностей монокристаллов осуществлялся на электронном сканирующем микроскопе Thermo Fisher Scientific Apreo S LoVac (СЭМ). При помощи приставки для энергодисперсионного спектрального микроанализа на этом же микроскопе были получены профили распределения химических элементов вглубь монокристаллического образца. Также были подготовлены фольги для просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ, JEM 2100), что позволило уточнить фазовый состав монокристаллов после ИПО. Профили микротвердости в моно- и поликристаллах были построены на основе данных, полученных методом Виккерса с нагрузкой на индентор 25 г (Микротвердомер AFFRI DM8). Фазовый состав поликристалла АНС до и после проведения ионно-плазменного насыщения выявлялся при помощи рентгенофазового анализа на дифрактометре ДРОН-7, в Со-Ка излучении.

Благодарности:

Автор работы выражает благодарность д.ф.-м.н. Чумлякову Ю.И. (г. Томск) за предоставленные для исследования монокристаллы аустенитной нержавеющей стали и д.т.н. Рамазанову К.Н. (г. Уфа) за помощь с проведением ионно-плазменной обработки.

Исследование выполнено с использованием оборудования центра коллективного пользования «Нанотех» (г. Томск).

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

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ11	Загibalова Елена Андреевна

Школа	ИШИТР	Отделение	Отделение информационных технологий
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами; Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ; Тариф на электроэнергию – 3,16 руб./кВт Тариф на холодную воду – 56,76 руб./м3 Оклад научного руководителя – 42744 руб. Оклад студента – 19200 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование - 20-30%
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды 30 %; Накладные расходы – 70% Доп.зар. плата – 10%

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НИР	- Определение конкурентоспособности.
2. Разработка устава научно-технического проекта	- Структура исследовательской работы; - оценка трудоемкости работы.
3. Планирование процесса управления НИР: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	- Определение бюджета исследовательской работы; - выполнение SWOT-анализа проекта; - разработка графика проведения исследовательской работы.
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	- Финансовый показатель. - показатель ресурсоэффективности. - показатель эффективности.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Сегментирование рынка
2. Оценка конкурентоспособности технических решений
3. Матрица SWOT
4. График проведения и бюджет НИР
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИР
6. Потенциальные риски

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	30.01.2023
---	-------------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН, ШБИП	Гасанов М.А.	Д.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ11	Загibalова Елена Андреевна		

4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Основная цель данного раздела – оценка коммерческого и инновационного потенциала научно-исследовательской работы (НИР), а также определение его ресурсной, финансовой, экономической эффективности. Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

- Оценка коммерческого потенциала НИР.
- Планирование научно-исследовательской работы;
- Планирование процесса управления НИР: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок;
- Определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

Данная магистерская работа направлена на выявление протяженности, фазового состава и микротвердости поверхностного упрочненного слоя, сформированного при ионно-плазменном насыщении $\langle 001 \rangle$ -, $\langle 111 \rangle$ -монокристаллов и поликристаллов аустенитной нержавеющей стали при температуре 550°C , а также выявление ориентационной зависимости данных характеристик поверхностного слоя. Полученные данные позволят в дальнейшем более точно подбирать режимы ионно-плазменного насыщения изделий/деталей из аустенитной нержавеющей стали, что позволит удешевить стоимость изделия или же в целом механизма в сборке.

Отметим, что это исследование выполнено в рамках инициативной работы как дополнение к проекту РФФИ № 20-38-70031 «Механизмы формирования упрочненных слоев при ионно-плазменной обработке аустенитной нержавеющей стали в смеси газов (C, H, N)», что позволяет расширить круг данных для подбора режима ИПО изделий из АНС.

4.1 Предпроектный анализ

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Результаты данной магистерской работы относятся к фундаментальным исследованиям, на которых в дальнейшем может базироваться подбор режима ионно-плазменной обработки изделий или деталей механизма, изготовленных из аустенитной нержавеющей стали.

Хорошие коррозионная стойкость, пластичность и свариваемость аустенитных нержавеющей сталей (АНС) позволяют находить им применение в авиа- и

машиностроении, медицине и других отраслях промышленности. Ограничением для более широкого применения служат низкие износостойкость и поверхностная твердость АНС, которые можно устранить с помощью ионно-плазменной обработки (ИПО) по заданному режиму. Обычно, в промышленности, где необходимы изделия/детали со специальными свойствами применяют сплавы с добавлением дорогостоящих легирующих элементов. Иногда, в качестве альтернативы, предлагается использовать менее дорогой материал, подвергнуты ионно-плазменному насыщению по определенному режиму. Таким образом можно заменить дорогостоящие марки сталей в процессе изготовления изделий/деталей на менее дорогие материалы с последующей обработкой. При всем этом менее дорогостоящий аналог не будет иметь потери показателей эксплуатационных свойств изделий/деталей.

Сегментацию рынка можно провести среди заинтересованных отраслей промышленности по степени потребности в полученных данных для подбора оптимального режима обработки материала, с целью снизить себестоимость изделия/детали. Результаты сегментирования приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Карта сегментирования рынка по необходимости данных для подбора оптимального режима ИПО

		Отрасли промышленности, заинтересованные в полученных данных			
		Авиационная отрасль	Машиностроение	Судостроение	Атомная отрасль
Размер	Крупные				
	Средние				
	Мелкие				
	Фирма А (частные предприятия)		Фирма Б (производства, относящиеся к муниципальной собственности)		Фирма В (государствен ные предприятия)

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Оценка коммерческой ценности работы – необходимое условие для поиска источников финансирования проведения научного исследования. В связи с тем, что существует достаточно большое количество видов обработки, в данном анализе будут рассмотрены наиболее распространенные для АНС.

Для сравнения аналогов и выявления наиболее подходящего варианта составим оценочную карту, таблица 7. Данная карта содержит в себе оценку ресурсоэффективности с использованием технических и экономических критериев ионно-плазменной обработки АНС (1), химико-термическая обработка АНС в газовой среде азота (2) и термомеханическая обработка АНС (3). Оценивание будет проходить по 5-ти бальной шкале, где 5 – наивысшая оценка, а 1 – наименьшая. Вес всех показателей в сумме составляют 1.

Расчет конкурентоспособности, на примере трудоемкости подготовки образцов для исследования, определяется по формуле 3:

$$K = \sum B_i + B_i \quad (3)$$

где K – конкурентоспособность проекта;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл показателя.

Таблица 7 – Оценочная карта сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _{к1}	Б _{к2}	Б _{к3}	К _{к1}	К _{к2}	К _{к3}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Возможность проведения обработки без дополнительного оборудования	0,2	4	3	3	0,8	0,6	0,6
2. Выполненная обработка не требует дополнительной обработки	0,12	5	4	4	0,6	0,48	0,48
3. Применение обработки в независимости от конфигурации изделия	0,2	5	4	3	1	0,8	0,6
4. Скорость выполнения обработки	0,15	4	3	2	0,6	0,45	0,3
5. Безопасность	0,11	4	3	2	0,44	0,33	0,22
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Цена	0,12	5	4	5	0,6	0,48	0,6
2. Затраты на ремонт оборудования, используемого при проведении обработки стали	0,1	3	3	4	0,3	0,3	0,4
ИТОГО:	1	30	24	23	4	3,44	3,2

Проведенный анализ конкурентных технических решений показал, что вариант обработки №1 (ионно-плазменной обработки АНС) является наиболее предпочтительным. А также является наиболее выгодным и эффективным типом для исполнения. Помимо этого, два других рассмотренных метода могут составить конкуренцию для ИПО за счет своей распространённости на производствах на территории РФ.

4.1.3 SWOT-анализ

SWOT-анализ – это комплексный анализ научно-исследовательского проекта, включающий: Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы). Анализ производится в несколько этапов.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта и выявлении возможностей и угроз для его реализации, которые проявились или могут появиться во внешней среде. Суть второго этапа состоит в сопоставлении сильных и слабых сторон НИР проекта к условиям окружающей среды.

В таблице 8 приведена итоговая матрица SWOT-анализа. Интерактивная матрица проекта прописана в таблице 9.

Таким образом, по результатам SWOT-анализа можно заключить, что ионно-плазменная обработка АНС обладает большим количеством сильных сторон. Наиболее заинтересованными в данных разработках будут атомная энергетика, а также судостроительные и авиастроительные компании. Для усиления своих слабых сторон, а также предотвращения возможных угроз необходимо решить вопрос режима обработки. Для получения оптимальных свойств и характеристик поверхностных слоев необходимо провести ряд уточняющих исследований, базирующихся на полученных данных и образцах материала, из которого изготовлены изделия/детали. Это связано с влиянием химического состава изделия на параметры упроченного слоя. Отметим, экологичность процесса, также является благоприятными факторами для внедрения на рынок результатов данного исследования.

Таблица 8 – Итоговая матрица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны: S1. Простота и экономичность использования метода обработки АНС; S2. Большой объем и доступность сырья (АНС 01X17Н13М3, азот); S3. Наличие спроса на разрабатываемую тему; S4. Экологичность технологии. Не несет каких-либо вредных воздействий на окружающую среду; S5. Невысокая стоимость исходного сырья.</p>	<p>Слабые стороны: W1. Необходимость четкого следования режиму обработки, для воспроизведения точных результатов. W2. Отсутствие бизнес-плана коммерциализации; W3. Не проработаны вопросы выхода на рынок.</p>
<p>Возможности: O1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ; O2. Использование современного оборудования ЦКП «Нанотех» ИФПМ СО РАН; O3. Возможность выхода на рынок и начала поставок; O4. Возможность поддержания проектов фондами РФФИ и РНФ.</p>	<p>O1, O2, S1, S2, S3, S4 – проведения НИР на базе лаборатории без вовлечения дополнительного финансирования; В случае: O3, O4, S3, S5 – получение дополнительного финансирования от государства и заинтересованных фирм и предприятий.</p>	<p>O1, O2, W1 – проработать режимы обработки.</p>
<p>Угрозы: T1. Появление производителей с более развитыми технологиями и низкими издержками; T2. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства; T3. Изменения направления работы лаборатории.</p>	<p>T1, S1, S2, S5 – отсутствие спроса на новые технологии производства не произведет значительного негативного влияния на проект. T2, S3, S5 – достижение высоких эксплуатационных свойств стали обеспечит спрос на промышленном рынке.</p>	<p>T1, W1 – появление конкурентов с новейшими разработками, с развитыми научно-исследовательскими институтами; T2, W2, W3 – разработать бизнес-план коммерциализации.</p>

Таблица 9 – Интерактивная матрица проекта

		Сильные стороны					Слабые стороны		
		S1	S2	S3	S4	S5	W1	W2	W3
Возможности	O1	+	0	+	+	0	+	-	-
	O2	+	0	+	+	0	+	-	-
	O3	+	+	+	+	+	-	+	+
	O4	0	0	+	+	0	-	-	-
Угрозы	T1	+	0	+	0	0	0	+	+
	T2	-	-	+	0	+	-	+	+
	T3	0	0	-	0	0	-	-	-

4.2 Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Для этого необходимо заполнить специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта, таблица 10.

Таблица 10 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	4	3
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	3	3
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	4	4
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	3	3
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	3
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	4	3
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	3	2
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	2
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	4	4
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	4	3
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	1
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	3	3
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	3	3
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	3	3
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	5	3
	ИТОГО БАЛЛОВ	50	43

Итоговые значения проработанности научного проекта и знания у разработчика лежат в диапазоне от 40 до 50 (43 балла по таблице 10), что говорит о средней

перспективности проекта. Многие аспекты вывода продукта на рынок не были учтены, а также проявляется недостаток знаний. Следовательно, требуются дополнительные затраты на наём или консультации у соответствующих специалистов.

4.3 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Перспективность данного научного исследования выше среднего, при этом не все аспекты рассмотрены и изучены. Таким образом, для организации предприятия этого недостаточно (пункт 4-8 не подходят). Но так как основной научно-технический задел определен, этого достаточно для коммерциализации для метода – инжиниринг (пункты 1-3). Степени проработанности научного проекта и уровень знаний разработчика достаточно для реализации этого пункта. Проводимое исследование включает в себя описание характеристик поверхностных упрочненных слоев, сформированных при ионно-плазменном насыщении моно- и поликристаллических образцов аустенитной нержавеющей стали является дополнением базы данных, служащей для подбора режима обработки данного класса сталей, в результате которой происходит повышение прочностных свойств поверхностей изделий/деталей механизма. Ионно-плазменное насыщение позволяет снизить стоимость изделий или деталей механизма, что приводит к снижению себестоимости конструкции/механизма в целом. Также данный метод обработки позволяет снизить содержание дорогостоящих легирующих элементов в изделии или механизме.

4.4 Инициация проекта

В результатах исследования заинтересовано научное сообщество, различные фонды и различные отрасли промышленности, поскольку полученные знания могут быть применены для получения материалов с уникальным комплексом эксплуатационных свойств. Далее представлена таблица 11, где указаны заинтересованные стороны проекта.

Таблица 11 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидание заинтересованных сторон
ИФПМ СО РАН, дополнение проекта РФФИ № 20-38-70031 (Пользователь)	Расширение базы данных для подбора режима ионно-плазменной обработки, экономическая выгода
Научный руководитель (консультант от ИФПМ СО РАН)	Оправдание цели исследования, материальная выгода, повышение категории профессии
Научный руководитель от НИ ТПУ	Расширение объёма знаний в свойствах объекта исследования, выполненная выпускная квалификационная работа
Студент	Интеллектуальный рост, выполненная выпускная квалификационная работа, повышение категории профессии

Цели и результат проекта представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	<ul style="list-style-type: none"> • Изучить исследуемый материал до проведения ионно-плазменного насыщения; • Изучить методы и материалы исследования; • Проконтролировать изготовление образцов для исследования; • Исследовать опытные образцы на определение механических свойств после ионно-плазменного насыщения; • Изучить микроструктуру образцов после ионно-плазменного насыщения; • Исследовать фазовый состав полученных споверхностных слоев; • Провести измерение микротвердости поверхностных слоев; • Анализ полученных данных и выявление в них зависимостей.
Ожидаемые результаты проекта:	Выявление новых данных об ориентационной зависимости гетерофазных слоев, сформированных при ионно-плазменной обработке при температуре 550°C. Расширение базы данных для более точного подбора оптимального режима обработки.
Критерии приемки результата проекта:	Удовлетворяющие результаты проведенного исследования
Требования к результату проекта:	<p>Требование:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Должен быть осуществлен точный анализ поверхностных упрочненных слоев, для предоставление достоверных результатов исследования. • Результаты исследования должны быть подкреплены несколькими методами.

Для осуществления проекта была собрана научная группа, которая проводила исследования, таблица 13.

Таблица 13 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудо- затраты, час.
1	Астафурова Елена Геннадьевна, научный руководитель, д.ф.- м.н., зав. лаб.	Руководитель (Р)	Постановка задачи, координация выполнения проекта, подбор и изучение литературных данных по теме исследования, написание отчета.	416
2	Панченко Мариан Юрьевна, младший научный сотрудник, без степени	Исполнитель (И ₁)	Проведение исследование микроструктуры с помощью сканирующего и просвечивающего микроскопов.	144
3	Реунова Ксения Андреевна, младший научный сотрудник, без степени	Исполнитель (И ₂)	Проведение рентгеноструктурного и рентгенофазового анализа.	80
4	Инженер (магистрант)	Исполнитель (магистрант) (И _М)	Пробоподготовка, исследование структуры с помощью оптического микроскопа, определение микротвердости образца после ИПО, расшифровка и обработка полученных данных, подбор и изучение литературных данных по теме исследования, написание отчета	632
ИТОГО:				1272

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» – параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта. В таблице 14 представлены ограничения проекта.

Таблица 14 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
3.1 Бюджет проекта	1545395,31 руб.
3.1.1 Источник финансирования	РФФИ, РФФ
3.2 Сроки проекта:	06.02.2023– 01.06.2023

4.5 Планирование управления научно-техническим проектом

4.5.1 Иерархическая структура работ проекта

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей [53].

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта. На рисунке 18 представлен шаблон иерархической структуры [53].



Рисунок 18 – Иерархическая структура по ВКР [53]

В данном проекте будет использована иерархическая структура по ВКР, так как она подходит больше, потому что исследование проводится по уже изученной технологии, сложность проекта не высокая.

4.5.2 План проекта

Одной из основных целей планирования работ является определение общей продолжительности их проведения. Для организации процесса разработки инструментального средства построены календарный план и его иллюстрация в диаграмме Канта, что представлено в таблице 15 и таблице 16 соответственно. Данный подход позволяет графически представить план выполнения предстоящих работ, связанных с разработкой системы, его анализ и оптимизацию, что позволяет упрощать решения поставленных задач, координировать ресурсы времени, рабочие силы и последствия отдельных операций. Диаграмма Ганта является наиболее удобным и наглядным способом представления графика проведения работ и представляет собой отрезки, размещенные на горизонтальной шкале времени. Каждый отрезок соответствует отдельной задаче или подзадаче. Начало, конец и длина отрезка на шкале времени соответствуют началу, концу и длительности задачи

Таблица 15 – Календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Составление и утверждение технического задания	1	06.02.2023	06.02.2023	Р
2	Подбор и изучение литературы по теме	10	07.02.2023	20.02.2023	Р, И _М
3	Календарное планирование работ	3	21.02.2023	23.02.2023	Р
4	Подготовка образцов, проведение экспериментов и анализ полученных данных	28	24.02.2023	04.04.2023	И ₁ , И ₂ , И _М
5	Сопоставление результатов экспериментов с опубликованными результатами в научных статьях	9	05.04.2023	17.04.2023	Р, И _М
6	Написание отчета	32	18.04.2023	01.06.2023	Р, И _М
Итого:		93			

Р – руководитель НИР; И₁, И₂ – исполнители из таблицы 10; И_М - Инженер (магистрант).

Таблица 16 – Календарный план-график проведения НИР

Код работы	Вид работ	Исполнители	Т _{к.} раб. дн.	Продолжительность выполнения работ												
				Февраль		Март			Апрель			Май			Июнь	
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	
1	Составление и утверждение технического задания	Р	1													
2	Подбор и изучение литературы по теме	Р, И _М	10													
3	Календарное планирование работ	Р	3													
4	Подготовка образцов, проведение экспериментов и анализ полученных данных	И ₁ , И ₂ , И _М	28													
5	Сопоставление результатов экспериментов с опубликованными результатами в научных статьях	Р, И _М	9													
6	Написание отчета	Р, И _М	32													
	И _М – исполнитель (магистрант)															
	И ₁ – исполнитель															
	И ₂ – исполнитель															
	Р – руководитель															

4.6 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НИР используется группировка затрат по следующим статьям:

- материальные затраты НИ;
- затраты на специальное оборудование для экспериментальных работ;
- основная заработная плата исполнителей НИР;
- дополнительная заработная плата исполнителей НИР;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- накладные расходы НИР.

В таблице 17 отражена стоимость материалов, используемых в научно-исследовательской работе.

Таблица 17 – Расходные материалы (C_m)

Наименование материалов	Количество	Цена за ед., (руб.)	Сумма, (руб.)
Сталь 01X17H13M3, Fe-16,8Cr-13,3Ni-2,7Mo-1,7Mn-0,6Si-0,01C	1 кг	35 000	35 000
Заготовка монокристалла АНС, Fe-18,6Cr-16,8Ni-0,07Mn-0,07Si-0,001C	0,3 кг	300 000	90 000
Азот, N	10 л	40	400
Аргон, Ar	28 л	47,5	1 330
Ацетилен, C ₂ H ₂	2 л	165	330
Бумага для шлифования образцов разной зернистости	20 шт	200	4 000
Мелкодисперсная паста для полировки	0,1 л	60 000	6 000
Всего за материалы			137060
Транспортно-заготовительные расходы (5%)			6853
Итого по статье C_m			143913

Монокристаллы АНС, исследовавшиеся в ходе НИР, были переданы в лабораторию д.ф.-м.н. Ю. И. Чумляковым безвозмездно. Отметим, что стоимость монокристаллических образцов аустенитной нержавеющей стали прописана на тот случай, если лаборатория покупает данные заготовки монокристаллов АНС для дальнейшего исследования.

Специальное оборудование для НИР – в данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования, необходимого для проведения

работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене, таблица 18. Однако оборудование, использованное в данном исследовании, уже имеется в центра коллективного пользования «Нанотех», ИФПМ СО РАН, и стоимость оборудования, учитывается в виде амортизационных отчислений, таблица 19. Модернизированная установка ЭЛУ-5, предназначенная для проведения ионно-плазменного насыщения, находится в г. Уфа, где также заключен договор на пользование установкой.

Расчет амортизации проводится по следующим пунктам:

Норма амортизации, формула 4:

$$H_A = \frac{1}{n} \quad (4)$$

где n – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация, формула 5:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{12} \cdot m \quad (5)$$

где I – итоговая сумма, тыс. руб.; m – время использования, мес.

В случае данной НИР $m = 1$, так как работа с каждым из перечисленных приборов/установок осуществлялась на протяжении одного месяца.

Таблица 18 – Специальное оборудование для экспериментальных работ

Наименование оборудования	Количество	Сумма, (руб.)
Электрическая нагревательная печь СНОУЛ	1 шт.	1 000 000
Прокатный стан ДУО-250	1 шт.	1 000 000
Модернизированная установка ЭЛУ-5	1 шт.	3 500 000
Микроскоп MET 1С	1 шт.	300 000
Шлифовальная машина TinuPol-5	1 шт.	1 600 000
Дифрактометр ДРОН-7	1 шт.	10 000 000
Просвечивающий электронный микроскоп Technai G2 FEI	1 шт.	85 000 000
Установка для ионного утонения JEOL ION SLICER EM-09100 IS	1 шт.	4 000 000
Микроскоп электронный сканирующий Thermo Fisher Scientific Apreo S LoVac с аналитическим EDS+EBSD комплексом	1 шт.	165 000 000
Микротвердомер AFFRI DM8	1 шт.	7 000 000
Итого:		278 400 000

Таблица 19 – Затраты на оборудование и его амортизация

Наименование оборудования	Кол-во, шт	Срок полезного использования, лет	Цены ед. Оборудования, руб.	Норма амор-ии, формула 2	Амор-ция, руб
Электрическая нагревательная печь СНОУЛ	1	20	1 000 000	0,05	4167
Прокатный стан ДУО-250	1	20	1 000 000	0,05	4167
Модернизированная установка ЭЛУ-5	1	30	3 500 000	0,03	9722
Микроскоп MET 1С	1	30	300 000	0,03	833
Шлифовальная машина TinuPol-5	1	20	1 600 000	0,05	6667
Дифрактометр ДРОН-7	1	30	10 000 000	0,03	27778
Просвечивающий электронный микроскоп Technai G2 FEI	1	30	85 000 000	0,03	236111
Установка для ионного утонения JEOL ION SLICER EM-09100 IS	1	30	4 000 000	0,03	11111
Микроскоп электронный сканирующий Thermo Fisher Scientific Apreo S LoVac с аналитическим EDS+EBSD комплексом	1	30	165 000 000	0,03	458333
Микротвердомер AFFRI DM8	1	30	7 000 000	0,03	19444
Итого:					778333

Основная заработная плата исполнителей НИР

В данном подразделе рассчитывается заработная плата исполнителей и руководителя проекта, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада, таблица 20.

Таблица 20 – Баланс рабочего времени исполнителей

Показатели рабочего времени	Руководитель	Исполнитель (магистрант)	Исполнитель 1	Исполнитель 2
Календарное число дней	365	365	365	365
Количество нерабочих дней				
- выходные дни	104	104	104	104
- праздничные дни	14	14	14	14
Потери рабочего времени				
- отпуск	24	24	24	24
- невыходы по болезни				
Действительный годовой фонд рабочего времени	223	223	223	223

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_b \cdot (1 + k_{np}) \cdot k_p \quad (6)$$

где Z_b – базовый оклад, руб.; k_{np} – премиальный, (определяется Положением об оплате труда) равен 0,3; коэффициент k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Основная заработная плата $Z_{осн}$ одного работника рассчитывается по формуле 7:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p \quad (7)$$

где $Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата, руб.; T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дн., таблица 15.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле 8:

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_{\delta}} \quad (8)$$

где Z_m – должностной оклад работника за месяц; F_{δ} – действительный годовой фонд рабочего времени исполнителей, раб.дн., таблица 17; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года.

Важно отметить, что при отпуске в 24 раб. дня – $M = 11,2$ месяца, 5-дневная рабочая неделя;

Помимо настоящего проекта, руководитель работает в других проектах, поэтому руководитель не может посвятить все свое рабочее время решению поставленных задач в

данном проекте. Исходя из этого, доля участия 25%, следовательно T_p раб.дн. умножить на 0,25 и округлить до целого числа.

Таблица 21 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{б,}$ руб.	$k_{пр}$	k_p	$Z_{м,}$ руб	$Z_{дон,}$ руб.	$T_p,$ раб. дн.	$Z_{осн,}$ руб.
Руководитель	42744	0,3	1,3	72237	3628	14	50793
Исполнитель (магистрант)	19200	0,3	1,3	32448	1630	79	128744
Исполнитель 1 (младший научный сотрудник, без степени)	17752	0,3	1,3	30001	1507	28	42190
Исполнитель 2 (младший научный сотрудник, без степени)	17752	0,3	1,3	30001	1507	28	42190

Дополнительная заработная плата определяется по формуле 9:

$$Z_{дон} = k_{дон} \cdot Z_{осн} \quad (9)$$

где $Z_{дон}$ – дополнительная заработная плата, руб.; $k_{дон}$ – коэффициент дополнительной зарплаты (0,1); $Z_{осн}$ – основная заработная плата, руб. В таблице 22 приведены итоговые расчеты по заработной плате исполнителей.

Таблица 22 – Зарплата исполнителей

Зарплата плата	Руководитель	Исполнитель (магистрант)	Исполнитель 1 (младший научный сотрудник, без степени)	Исполнитель 2 (младший научный сотрудник, без степени)
Основная зарплата	50793	128744	42190	42190
Дополнительная зарплата	5079,3	12874,4	4219	4219
Зарплата исполнителя	55872,3	141618,4	46409	46409
Итого по статье $C_{зп}$	290308,7			

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{дон}) \quad (10)$$

где $k_{внеб} = 0,27$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.). Расчетные данные приведены в таблице 23.

Таблица 23 – Отчисления во внебюджетные фонды за исполнителей

Заработная плата	Руководитель	Исполнитель (магистрант)	Исполнитель 1 (младший научный сотрудник, без степени)	Исполнитель 2 (младший научный сотрудник, без степени)
Отчисления во внебюджетные фонды	15085,52	38236,97	12530,43	12530,43
Итого по статье <i>С_{внеб}</i>	78383,35			

Накладными расходами учитываются прочие затраты организации, такие как: печать и ксерокопирование проектировочных документов, оплата услуг связи, энергопотребление оборудования.

Расчет накладных расходов ведется по формуле 11:

$$C_{накл} = k_{накл} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) \quad (11)$$

где $k_{накл} = 0,7$ – коэффициент накладных расходов.

Расчетные данные по этой статье расходов представлены в таблице 24.

Таблица 24 – Накладные расходы исполнителей НИР

Заработная плата	Руководитель	Исполнитель (магистрант)	Исполнитель 1 (младший научный сотрудник, без степени)	Исполнитель 2 (младший научный сотрудник, без степени)
Отчисления во внебюджетные фонды	39110,6	99132,9	32486,3	32486,3
Итого по статье <i>С_{внеб}</i>	203216,09			

Далее будут представлены расчёты по прочим прямым затратам.

Затраты на электроэнергию.

Затраты на электроэнергию рассчитываются как сумма произведения мощности оборудования, времени работы и стоимость электроэнергии (3,16 руб./кВт). Результаты расчетов и мощности приборов и установок показаны в таблице 25.

Таблица 25 – Затраты на электроэнергию

Установки и приборы	Мощность, кВт	Часы работы	Тариф	Итог
Электрической нагревательной печи СНОУЛ	3,7	20	3,16 руб./кВт	50673,57 руб.
Модернизированная установка ЭЛУ-5	110	14		
Прокатный стан ДУО-250	55	5		
Микроскоп MET 1С	0,03	38		
Шлифовальная машина TinuPol-5	0,2	19		
Дифрактометр ДРОН-7	3	34		
Просвечивающий электронный микроскоп Technai G2 FEI	200	16		
Установка для ионного утонения JEOL ION SLICER EM-09100 IS	74	80		
Микроскоп электронный сканирующий Thermo Fisher Scientific Apreo S LoVac с аналитическим EDS+EBSД комплексом	320	15		
Микротвердомер AFFRI DM8	5	24		

Затраты на холодную воду.

Затраты на холодную воду рассчитываются как произведение количества использованной холодной воды и цены (56,76 руб/м³).

Из этого следует: $56,76 \cdot 10 = 567,6$ руб.

Итого прочие затраты составляют:

$$50673,57 + 567,6 = 51241,17 \text{ руб.}$$

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости НИР по форме, приведенной в таблице 26.

Таблица 26 – Группировка затрат по статьям

Сырье, материалы, руб	143913
Амортизация специального оборудования для научных работ, руб	778333
Основная заработная плата, руб	263917
Дополнительная заработная плата, руб	26391,7
Отчисления на социальные нужды, руб	78383,35
Итого без накладных расходов, руб	1290938,05
Накладные расходы, руб	203216,09
Прочие прямые затраты, руб	51241,17
Итого бюджетная стоимость, руб	1545395,31

4.7 Вывод по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

В ходе разработки данной главы выпускной квалификационной работы были решены следующие задачи:

1. Проанализировав основные критерии сравнения, из чего можно сделать вывод, что знания полученные в ходе проведения исследования вносит большой вклад в фундаментальные науки, и как следствие оказывает влияние на развитие технологий. Поскольку проект финансируется только правительством, и не имеет поддержки со стороны коммерческих организаций, в случае незаинтересованности государства в результатах исследования, работа в данном направлении может быть приостановлена или перенаправлена в другую отрасль. Также можно провести дополнительные поиски заинтересованных коммерческих организаций.

2. Составлен план научного исследования, в котором разработан календарный план. Для иллюстрации календарного плана была использована диаграмма Ганта, что указывает на целесообразность проведения данного исследования. Рассчитан бюджет научного исследования. Из проведенного анализа следует, что общая стоимость настоящего научного исследования 1545395,31 руб.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Публикации в изданиях, входящих в базы Scopus или Web of Science

1. V. A. Moskvina, E. G. Astafurova, K. N. Ramazanov, G. G. Maier, S. V. Astafurov, M. Yu. Panchenko, E. V. Melnikov, Y. P. Mironov, **E. A. Zagibalova**. The influence of prior deformation on phase composition and strength properties of austenitic stainless steel in ion-plasma treatment // *Letters on Materials*. – 2019. – Т. 9. – №. 4. – С. 377-381.
2. V. A. Moskvina, G. G. Maier, **E. A. Zagibalova**. The effect of ion-plasma treatment on micromechanical characteristics of compositional layers in austenitic stainless steel with different grain sizes // *AIP Conference Proceedings*. – AIP Publishing LLC, 2019. – Т. 2167. – №. 1. – С. 020233.
3. V. A. Moskvina, **E. A. Zagibalova**. The influence of ion-plasma treatment on microhardness and tensile yield strength of austenitic stainless steel with different grain size and microstructure // *AIP Conference Proceedings*. – AIP Publishing LLC, 2020. – Т. 2310. – №. 1. – С. 020211.
4. V. A. Moskvina, G. G. Maier, E. V. Melnikov, S. V. Astafurov, **E. A. Zagibalova**, M. Yu. Panchenko, K. A. Reunova, A. A. Nikolaev, K. N. Ramazanov, E. G. Astafurova. The effect of thin surface layer of nitrogen-expanded austenite on bulk γ - α ' phase transformation in low-temperature deformation of 316L stainless steel // *Materials Letters*. – 2021. – Т. 304. – С. 130676.
5. S. V. Astafurov, E. V. Melnikov, K. A. Reunova, M. Yu. Panchenko, **E. A. Zagibalova**, K. V. Krukovskii, E. G. Astafurova. The way to improve strength and ductility of heavily carbon-alloyed high-entropy Fe₂₀Mn₂₀Cr₂₀Ni₂₀Co₁₅C₅ alloy // *Materials Science and Engineering: A*. – 2022. – Т. 851. – С. 143628.
6. Е. Г. Астафурова, К. А. Реунова, М. Ю. Панченко, Е. В. Мельников, И. А. Тумбусова, **Е. А. Загибалова**, С. В. Астафуров. Температурная зависимость механических свойств, деформационного упрочнения и разрушения гетерофазного сплава FeMnNiCoCr // *Физика металлов и металловедение*. – 2022. – Т. 123. – № 12. – С. 1325-1333.
7. E. G. Astafurova, K. A. Reunova, M. Yu. Panchenko, E. V. Mel'nikov, I. A. Tumbusova, **E. A. Zagibalova**, S. V. Astafurov. The temperature dependences of mechanical properties, deformation hardening, and fracture of FeMnNiCoCr heterophase alloy // *Physics of Metals and Metallography*. – 2022. – С. 1-8.
8. E. G. Astafurova, K. A. Reunova, E. V. Mel'nikov, M. Yu. Panchenko, S. V. Astafurov, A. V. Luchin, **E. A. Zagibalova**, E. A. Kolubaev. A comparison of low-temperature

deformation behavior and fracture in low-carbon steel specimens obtained by electron beam additive manufacturing and conventional casting and normalization //Materials. – 2023. – Т. 16. – №. 1. – С. 446.

9. S.V. Astafurov, E.V. Melnikov, M.Y. Panchenko, K.A. Reunova, A.V. Luchin, **E.A. Zagibalova**, E.G. Astafurova, E.A. Kolubaev. Strain-rate dependent deformation behavior of additively manufactured stainless steel with different fractions of δ -ferrite //Letters on Materials. – 2023. – Т. 13. – №. 1. – С. 28-32.

Публикации в ведущих научных изданиях (ВАК) / РИНЦ

10. В. А. Москвина, Е. Г. Астафурова, К. Н. Рамазанов, Г. Г. Майер, С. В. Астафуров, М. Ю. Панченко, Е. В. Мельников, **Е. А. Загibalова**. Влияние деформационных дефектов на фазовый и элементный состав упрочненных поверхностных слоев аустенитной нержавеющей стали, формируемых при ионно-плазменной обработке // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2019. – №. 3. – С. 23-32.

11. **Е. А. Загibalова**, В. А. Москвина, С. В. Астафуров, Г. Г. Майер, Е. В. Мельников, М. Ю. Панченко, К. Н. Рамазанов, Е. Г. Астафурова Исследование прочностных и пластических характеристик композиционных слоев в аустенитной нержавеющей стали, подвергнутой ионно-плазменной обработке, методом наноиндентирования // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2020. – №. 1. – С. 32-40.

12. **E. A. Zagibalova**, V. A. Moskvina, G. G. Mayer. The influence of method and temperature of ion-plasma treatment on physical and mechanical properties of surface layers in austenitic stainless steel. // Frontier Materials & Technologies. – 2021. – №. 4 – pp. 17-26.

13. В. А. Москвина, Е. В. Мельников, **Е. А. Загibalова**. Особенности градиентного материала на основе нержавеющей хромоникелевой стали и сплава X20H80, изготовленного методом электронно-лучевой 3D-печати // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2021. – №. 3. – С. 57-66.

14. В. А. Москвина, Е. Г. Астафурова, К. Н. Рамазанов, Г. Г. Майер, С. В. Астафуров, Е. В. Мельников, **Е. А. Загibalова**. Влияние ионно-плазменной обработки на физико-механические характеристики поверхностных слоев аустенитной стали 01X17H13M3 // Тезисы докладов Международных конференций "Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций" и "Химия нефти и газа" в рамках Международного симпозиума "Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций". – 2018. – С. 157-158.

15. В. А. Москвина, Г. Г. Майер, К. Н. Рамазанов, **Е. А. Загibalова**, Е. Г. Астафурова. Влияние ионного азотирования на фазовый состав и структуру поверхностного слоя аустенитной нержавеющей стали // Сборник материалов XVI Российской научной студенческой конференции «Физика твердого тела». – 2018. – С. 76-77.

16. В. А. Москвина, Е. Г. Астафурова, Г. Г. Майер, К. Н. Рамазанов, **Е. А. Загibalова**. Влияние ионно-плазменного поверхностного упрочнения на элементный состав и нанотвердость аустенитной стали 01X17H13M3, с разным субструктурным состоянием // Перспективные материалы конструкционного и медицинского назначения: сборник трудов Международной научно-технической молодежной конференции, г. Томск, 26–30 ноября 2018 г.—Томск, 2018. – 2018. – С. 308-309.

17. М. Ю. Панченко, А. С. Михно, **Е. А. Загibalова**. Закономерности водородного охрупчивания высокоазотистой аустенитной стали, подвергнутой дисперсионному твердению // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XVI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 23-26 апреля 2019 г. Т. 1: Физика.—Томск, 2019. – Изд-во ТПУ, 2019. – Т. 1. – С. 265-267.

18. **Е. А. Загibalова**, В. А. Москвина. Влияние ионно-плазменной поверхностной обработки на фазовый состав и нанотвердость упрочненного слоя аустенитной нержавеющей стали // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XVI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 23-26 апреля 2019 г. Т. 1: Физика.—Томск, 2019. – Изд-во ТПУ, 2019. – Т. 1. – С. 145-147.

19. В. А. Москвина, Е. Г. Астафурова, К. Н. Рамазанов, Г. Г. Майер, С. В. Астафуров, Е. В. Мельников, М. Ю. Панченко, **Е. А. Загibalова**. Влияние ионно-

плазменной обработки на микромеханические характеристики композиционных слоев аустенитной нержавеющей стали с разным размером зерна // Тезисы докладов International Workshop. Международный междисциплинарный симпозиум "Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций". – 2019. – С. 104-105.

20. В. А. Москвина, **Е. А. Загibalова**. Влияние размера зерна в аустенитной нержавеющей стали на структурнофазовые характеристики композиционных слоев, сформированных при ионно-плазменном воздействии // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XVII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 21-24 апреля 2020 г. Т. 1: Физика.— Томск, 2020. – Изд-во ТУСУР, 2020. – Т. 1. – С. 137-139.

21. **Е. А. Загibalова**, В. А. Москвина. Фазовый и элементный состав композиционных поверхностных слоев, сформированных в аустенитной нержавеющей стали с различной микроструктурой методом ионно-плазменной обработки // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XVII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 21-24 апреля 2020 г. Т. 1: Физика.—Томск, 2020. – Изд-во ТУСУР, 2020. – Т. 1. – С. 82-84.

22. В. А. Москвина, Е. Г. Астафурова, К. Н. Рамазанов, **Е. А. Загibalова**. Особенности структуры и фазового состава упрочненных слоев, сформированных ионно-плазменной обработкой в аустенитной нержавеющей стали с разным размером зерна // Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии. Тезисы докладов Международной конференции. – 2020. – С. 310-311.

23. **Е. А. Загibalова**, В. А. Москвина, К. Н. Рамазанов, Е. Г. Астафурова. Влияние ионно-плазменного упрочнения на прочностные свойства стали 01X17H13M3 с деформационной зеренно-субзеренной и крупнокристаллической структурой // Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии. Тезисы докладов Международной конференции. – 2020. – С. 452-452.

24. В. А. Москвина, Е. Г. Астафурова, К. Н. Рамазанов, **Е. А. Загibalова**. Электронно-микроскопическое исследование микроструктуры композиционных слоев, сформированных при ионно-плазменной обработке образцов нержавеющей стали с различной структурой // Тезисы международной конференции и школы молодых ученых. Получение, структура и свойства высокоэнтропийных материалов. – 2020. – С. 69.

25. В. А. Москвина, **Е. А. Загibalова**, К. Н. Рамазанов. Влияние ионно-плазменной обработки на прочностные свойства аустенитной нержавеющей стали с разным размером зерна // Сборник тезисов. Уральская школа молодых металлосведов. Екатеринбург. – 2020. – С. 380-383.

26. В. А. Москвина, Е. Г. Астафурова, К. Н. Рамазанов, **Е. А. Загibalова**. Влияние размера зерна на закономерности формирования упрочненного слоя в аустенитной нержавеющей стали при ионно-плазменном воздействии // Сборник материалов X Международной школы. Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2021. – С. 259-260.

27. Е. Г. Астафурова, С. В. Астафуров, Е. В. Мельников, К. А. Реунова, В. А. Москвина, М. Ю. Панченко, И. А. Тумбусова, **Е. А. Загibalова**, А. С. Михно. Температурная зависимость деформационного упрочнения, механизмов деформации и разрушения многокомпонентного сплава FeMnNiCrCo, легированного азотом и углеродом // Сборник материалов X Международной школы, посвященной 10-летию лаборатории "Физика прочности и интеллектуальные диагностические системы" и LXIII Международной конференции, тезисы. Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2021. – С. 254.

28. Г. Г. Майер, В. А. Москвина, С. В. Астафуров, Е. В. Мельников, М. Ю. Панченко, К. А. Реунова, **Е. А. Загibalова**, Е. Г. Астафурова. Влияние состава газовой смеси при ионно-плазменной обработке на закономерности формирования упрочненного слоя и температурную зависимость механических свойств аустенитной нержавеющей стали // Сборник материалов X Международной школы, посвященной 10-летию лаборатории "Физика прочности и интеллектуальные диагностические системы" и LXIII Международной конференции, тезисы. Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2021. – С. 253.

29. Г. Г. Майер, В. А. Москвина, С. В. Астафуров, Е. В. Мельников, М. Ю. Панченко, К. А. Реунова, **Е. А. Загibalова**, К. Н. Рамазанов, Р. С. Есипов, Е. Г. Астафурова. Температурная зависимость механических свойств и механизмов разрушения аустенитной нержавеющей стали, подвергнутой ионно-плазменной обработке // Тезисы международной конференции. Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии. – 2021. – С. 46.

30. В. А. Москвина, Е. Г. Астафурова, **Е. А. Загibalова**. Влияние ионно-плазменного воздействия на фазовый состав и микротвердость упрочненных слоев в стали AISI 316L с разным размером зерна // Тезисы международной конференции. Физическая

мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии. – 2021. – С. 50.

31. В. А. Москвина, Е. Г. Астафурова, **Е. А. Загибалова**. Влияние ионно-плазменного воздействия на микроструктуру и фазовый состав поверхностного слоя в нержавеющей стали с разным размером зерна // Тезисы международной конференции Физика конденсированных состояний. – 2021. – С. 149.

32. **Е. А. Загибалова**, В. А. Москвина. Влияние температуры ионно-плазменного воздействия на фазовый состав азотированных слоев в аустенитной нержавеющей стали // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 27-30 апреля 2021 г. Т. 1: Физика.—Томск, 2021. – Томский политехнический университет, 2021. – Т. 1. – С. 130-132.

33. **Е. А. Zagibalova**, V. A. Moskvina. Transmission electron microscopical study of the stainless steel specimens after ion-plasma treatment // Тезисы международной конференции. Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии. – 2021. – С. 96.

34. **Е. А. Загибалова**, В. А. Москвина, А. С. Нифонтов. Ориентационная зависимость параметров поверхностного упрочненного слоя, сформированного в монокристаллах аустенитной нержавеющей стали при ионно-плазменном воздействии // Перспективы развития фундаментальных наук : сборник трудов XIX Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых – 2022. – Т. 1.– С. 80-82.

35. А. С. Нифонтов, М. Ю. Панченко, **Е. А. Загибалова**. Влияние дисперсных частиц на закономерности водородного охрупчивания высокоэнтропийного сплава кантора // Перспективы развития фундаментальных наук : сборник трудов XIX Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых – 2022. – Т. 1. – С. 146-148.

36. А. С. Нифонтов, М. Ю. Панченко, **Е. А. Загибалова**. Влияние размера зерна на закономерности водородного охрупчивания высокоэнтропийного сплава Кантора //Перспективные материалы конструкционного и функционального назначения: сборник научных трудов Международной научно-технической молодежной конференции, Томск, 17–21 октября 2022 г. – Томский политехнический университет, 2022. – С. 70-73.

37. E. G. Astafurova, K. A. Reunova, M. Yu. Panchenko, E. V. Melnikov, S. V. Astafurov, **Е. А. Zagibalova**, A. S. Nifontov. The effect of nitrogen alloying on stacking fault energy, dislocation arrangement and deformation mechanisms of high-entropy cantor alloy //Advanced High Entropy Materials. – 2022. – С. 25.

38. **Е. А. Загibalова**, А. С. Нифонтов, Е. Г. Астафурова. Ориентационная зависимость характеристик поверхностных упрочненных слоев в монокристаллах аустенитной нержавеющей стали после ионно-плазменного насыщения. Материалы во внешних полях : труды XII Международного онлайн-симпозиума / под ред. В.Е. Громова, Сибирский государственный индустриальный университет. – Новокузнецк : Издательский центр СибГИУ, 2023. – С. 70-71.