

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

---

Институт *физики высоких технологий*

Направление подготовки *Материаловедение и технологии материалов*

Кафедра *Материаловедение в машиностроении*

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
Влияние низкотемпературного ионного азотирования на особенности деформации и разрушения аустенитной нержавеющей стали 01Х17Н13М3, подвергнутой различным термомеханическим обработкам

УДК 669.018.8-047.37:621.789:621.785.532:539.375

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Б21	Москвина Валентина Александровна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
В.н.с. РАН	Астафурова Елена Геннадьевна	Д.ф.- м.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры менеджмента	Грахова Елена Александровна			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Назаренко Ольга Брониславовна	Д.т.н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Материаловедения в машиностроении	Панин Виктор Евгеньевич	Д.ф.- м.н., акад. РАН		

Томск – 2016 г.

*Планируемые результаты обучения по ООП 22.03.01 Материаловедение и технологии материалов (бакалавриат)*

<b>Код результата</b>	<b>Результат обучения (выпускник должен быть готов)</b>
P1	Применять основные положения и методы гуманитарных наук при решении социально-общественных и профессиональных задач в области материаловедения и технологии материалов
P2	Использовать современное информационное пространство при решении профессиональных задач в области материаловедения и технологии материалов
P3	Разрабатывать, оформлять и использовать техническую документацию, включая нормативные документы по вопросам интеллектуальной собственности в области материаловедения и технологии материалов
P4	Проводить элементарный экономический анализ ресурсов, технологий и производств при решении профессиональных задач в области материаловедения и технологии материалов
P5	Эффективно работать в коллективе на основе принципов толерантности, использовать устную и письменную коммуникации на родном и иностранном языках в мультикультурной среде
P6	Эффективно выполнять трудовые функции по реализации высокотехнологичных производств материалов и изделий
P7	Проводить комплексную диагностику материалов, процессов и изделий с использованием технических средств измерений, испытательного и производственного оборудования
P8	Готовность к мотивированному саморазвитию, самоорганизации и обучению для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности в области материаловедения и технологии материалов
P9	Успешно использовать методы и приемы организации труда, обеспечивающие эффективное, экологически, социально и технически безопасное производство
P10	Использовать принципы производственного менеджмента и управления персоналом в производственной деятельности в области материаловедения и технологии материалов

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

---

Институт *физики высоких технологий*

Направление подготовки *Материаловедение и технологии материалов*

Кафедра *Материаловедение в машиностроении*

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_ Панин В. Е.

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
4Б21	Москвиной Валентине Александровне

Тема работы:

Влияние низкотемпературного ионного азотирования на особенности деформации и разрушения аустенитной нержавеющей стали 01X17H13M3, подвергнутой различным термомеханическим обработкам

Утверждена приказом директора ИФВТ

Приказ № 505/с от 29.01.2016 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Стабильная аустенитная нержавеющая сталь Fe-17Cr-13Ni-1.7Mn-2.7Mo-0.5Si-0.01C мас.% (01X17H13M3).
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Установить влияние исходного структурного состояния аустенитной стали 01X17H13M3 (субмикроструктурного, мелко- и крупнокристаллического состояния) на параметры формирования азотированного слоя и его структурно-фазовые характеристики.</li><li>2. Исследовать влияние давления насыщающего газа на закономерности формирования упроченного слоя в стали 01X17H13M3 с разным размером зерна.</li><li>3. Исследовать механические, пластические свойства, параметры упрочнения и разрушения стали 01X17H13M3 при растяжении образцов, подвергнутых ионному азотированию, в зависимости от исходной обработки стали.</li></ol>

<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
<i>Финансовый менеджмент...</i>	<i>Е.А. Грахова, ассистент кафедры менеджмента НИ ТПУ</i>
<i>Социальная ответственность</i>	<i>Н.Б. Назаренко, профессор кафедры экологии и безопасности НИ ТПУ</i>
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
Реферат	

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

**Задание выдал руководитель:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
В.н.с. РАН	Астафурова Елена Геннадьевна	Д. ф.- м. н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
4Б21	Москвина Валентина Александровна		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 89 с., 14 рис., 19 табл., 53 источника.

Ключевые слова: аустенитная нержавеющая сталь, механические свойства, пластичность, разрушение, деформация, ионное азотирование, термомеханическая обработка.

Объектом исследования является аустенитная нержавеющая сталь 01X17H13M3.

Цель работы – установить влияние исходной термомеханической обработки на структуру, механические, пластические свойства и механизм разрушения аустенитной нержавеющей стали 01X17H13M3 после различных режимов ионного азотирования.

В процессе исследования проводили: термомеханическую обработку, низкотемпературное ионное азотирование, одноосное статическое растяжение, рентгеноструктурные и рентгенофазовые исследования, исследование структуры на световом микроскопе и просвечивающем электронном микроскопе, исследование разрушения и деформационного рельефа на сканирующем электронном микроскопе, а также измерение микротвердости.

В результате исследований было выявлено влияние исходной термомеханической обработки аустенитной стали 01X17H13M3 и последующего низкотемпературного ионного азотирования при различных давлениях насыщающего газа на механические, пластические свойства и механизм разрушения данной стали.

Степень внедрения: результаты исследований являлись частью отчета по гранту РФФИ проект № 15-38-50921.

Исследуемая сталь после предложенных обработок может найти применение в машиностроении, судостроении, авиационном строительстве, в деталях, узлах и конструкциях, работающих в условиях воздействия агрессивных сред, кислот, повышенных и пониженных температур.

В будущем планируется исследование закономерностей упрочнения аустенитной стали 01X17H14M3 при комбинировании высокотемпературного ионного азотирования и азотирования с эффектом полого катода и установление зависимости параметров формирования сверхтвердых фаз в стали от температуры ионного азотирования.

## ABSTRACT

Final qualifying work 89 p., 14 fig., 19 tabl., 53 references.

Keywords: austenitic stainless steel, mechanical properties, plasticity, fracture, deformation, ion nitriding, thermo-mechanical treatment.

Object of investigation is stable austenitic stainless steel 316L.

Purpose of the work – to establish the influence of thermo-mechanical treatment and low-temperature ion nitriding regimes on mechanical, plastic properties, and fracture mechanism in stable austenitic stainless steel.

During the research we conducted: preliminary thermomechanical treatments, low-temperature ion nitriding, tensile tests, XRD investigations, light microscopy, transmission electron microscopy, investigation of deformation and fracture mechanism using scanning electron microscopy, and microhardness tests.

As a result of investigations: the influence of initial thermo-mechanical treatment of austenite stainless steel following by low-temperature ion nitriding at different gas pressures on mechanical, plastic properties, and fracture mechanism of stable austenitic stainless steel was revealed.

Degree of integration: the study was used as a part of report of the RFBR project No.15-38-50921.

The investigated steel can be used in mechanical engineering, shipbuilding industry, the aviation, for details, assemblies and structures working in aggressive environments, acids, high and low temperatures.

In the future, I planned to research features of hardening of austenitic stainless steel by combining the high temperature ion nitriding and nitriding with effect of the hollow cathode and to establish the parameters of formation superhard phases on steel depending on ion nitriding temperature.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

1. ГЦК – гранецентрированная кубическая решетка ( $\gamma$ );
2. ОКР – области когерентного рассеяния, нм;
3. ОЦК – объемноцентрированная кубическая решетка ( $\alpha$ );
4. ПЭМ – просвечивающая электронная микроскопия;
5. СЭМ – сканирующая электронная микроскопия.
6.  $T_A$  – температура азотирования, °С;
7. ТИА – традиционное ионное азотирование;
8. ХТО – химико-термическая обработка;
9. ЭПК – эффект полого катода;
10. Параметр решетки:  $a$ , нм;
11. Микротвердость: Нц, ГПа;
12. Микродеформация кристаллической решетки:  $\Delta d/d$ ,  
примечание:  $d$  – межплоскостное расстояние;

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	10
1 Азотирование аустенитных нержавеющей сталей .....	12
1.1 Аустенитные нержавеющей стали .....	12
1.2 Азотирование сталей .....	13
1.3 Классификация процессов азотирования .....	17
1.4 Ионное азотирование в тлеющем разряде .....	18
1.5 Ионное азотирование с применением эффекта полого катода .....	20
1.6 Особенности структуры и свойств коррозионностойких сталей, подвергнутых ионному азотированию .....	23
2 Постановка задач исследования и методика эксперимента .....	26
2.1 Постановка задач исследования .....	26
2.2 Материал и методы исследования .....	27
3 Закономерности влияния термомеханических обработок на механические, пластические свойства, деформацию и механизм разрушения стали 01X17H13M3 после ионного азотирования .....	30
3.1 Влияние исходных термомеханических обработок на структуру и размер зерна стали 01X17H13M3.....	30
3.2 Механические и пластические свойства стали 01X17H13M3 в исходном состоянии и после ионного азотирования .....	33
3.3 Параметры упрочнения и механизм разрушения аустенитной стали, подвергнутой ионному азотированию .....	36
3.4 Рентгеноструктурный анализ стали после термомеханических обработок и ионного азотирования .....	42
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	46
4.1 Технико-экономическое обоснование НИР .....	46
4.2 Потенциальные потребители результатов исследования .....	46
4.3 Планирование работ по НИР .....	46
4.4 Определение трудоемкости выполнения работ .....	47

4.5 Построение графика работ .....	50
4.6 SWOT-анализ исследования .....	51
4.7 Бюджет научно-технического исследования (НИР).....	53
4.7.1 Расчет материальных затрат НИР .....	53
4.7.2 Основная заработная плата исполнителей НИР .....	55
4.7.3 Дополнительная заработная плата исполнителей темы .....	57
4.7.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) .....	57
4.7.5 Накладные расходы .....	58
4.7.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта .	58
4. Оценка научно-технического уровня НИР .....	59
5 Социальная ответственность .....	65
5.1 Профессиональная социальная безопасность организации при проведении исследований по азотированию аустенитной стали.....	66
5.1.1 Анализ вредных факторов, которые могут возникнуть в лаборатории ИФПМ СО РАН, обоснование мероприятий по их устранению .....	67
5.1.2 Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению .....	71
5. Экологическая безопасность.....	72
5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	73
5.3.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований и которые может инициировать объект исследования .....	73
5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	75
Заключение .....	77
Список публикаций.....	79
Список используемых источников.....	85

## **Введение**

Повысить коррозионную стойкость, микротвердость, износостойкость и усталостную прочность поверхностных слоев изделий из аустенитных нержавеющей сталей возможно комбинируя различные методы химико-термической обработки. Анализ современных литературных данных показал, что на сегодняшний день из всего многообразия методов поверхностного упрочнения азотирование является одним из наиболее распространенных способов структурно-фазового модифицирования металлов и сплавов. Азотирование является широко используемым промышленным методом создания композиционных материалов с поверхностно упрочненным слоем и вязкой матрицей, в которых повышенные прочностные и трибологические свойства сочетаются с высокой устойчивостью к коррозии [1,2]. Поверхностная твердость и глубина азотированного слоя определяются продолжительностью и температурой насыщения, составом насыщаемого (базового) материала и многими другими параметрами [1].

Ионное азотирование аустенитных нержавеющей сталей проводят с целью придания повышенной прочности поверхностному слою и для повышения устойчивости к коррозии. Одной из фундаментальных научных проблем в данной области является установление закономерностей диффузионных процессов и механизмов формирования сверхтвердых фаз при ионном азотировании аустенитных сталей и поиск путей улучшения характеристик модифицированных слоев при вариации параметров ионного азотирования. В этой связи изучение и разработка новых методов ионного азотирования и исследование механизмов формирования материалов с модифицированными слоями, которые будут обладать улучшенными свойствами, по сравнению с традиционными методами азотирования, является актуальной.

Традиционные методы насыщения сталей азотом требуют продолжительной выдержки материала при высоких температурах (более 500°C), поэтому для снижения энергоемкости процесса необходимо понижение

температуры обработки. Для того чтобы не снижать эффективность упрочнения поверхности, базовый материал необходимо подвергнуть предварительной обработке, например, поверхностному наклепу [3]. Ионное азотирование позволяет снизить время обработки материала по сравнению с азотированием в газе [3,4], дает перспективу получения материалов с контролируемыми параметрами (например, толщиной) азотированного слоя при относительно низких температурах.

Цель работы – установить влияние исходной термомеханической обработки на структуру, механические, пластические свойства и механизм разрушения аустенитной нержавеющей стали 01X17H13M3 после различных режимов ионного азотирования.

# **1 Азотирование аустенитных нержавеющей сталей**

## **1.1 Аустенитные нержавеющей стали**

Интенсивное развитие современной техники и технологий тесно связано с развитием и модификацией служебных характеристик и свойств материалов. Металлы и их сплавы, в частности стали, занимают особое место среди улучшаемых материалов, так как стали используются практически во всех отраслях человеческой деятельности. Одним из перспективных представителей сплавов на основе железа являются аустенитные хромоникельмолибденовые стали. Они обладают повышенными прочностными и упругими свойствами, высокой пластичностью и коррозионной стойкостью [5]. Также улучшение их характеристик представляется возможным посредством использования различных химико-термических и деформационных обработок.

Коррозионностойкими (нержавеющими) называют стали, способные сопротивляться электрохимической и химической коррозии, т.е. процесс коррозии в них развивается с малой скоростью [5,6]. В зависимости от условий эксплуатации устанавливают химические составы сталей, устойчивых против электрохимической коррозии. На сегодняшний день существует два основных класса таких сталей: хромистые, после охлаждения на воздухе имеющие структуру феррита, мартенсита и феррита (не более 10 % феррита) или мартенсита, и хромоникелевые, имеющие структуру аустенита, аустенита и мартенсита или аустенита и феррита (не более 10% феррита) [1,5,6]. Аустенитные коррозионностойкие стали подразделяют по структуре на стабильные (аустенитные) и метастабильные (аустенитно-мартенситные и аустенитно-ферритные) стали. Стали, легированные хромом, марганцем и никелем, сохраняющие структуру аустенита при охлаждении от высоких температур до комнатных и ниже, получили название нержавеющей стабильные аустенитные стали. Такие стали имеют ряд отличий перед метастабильными ферритными нержавеющей сталями, а именно: имеют умеренную твердость и прочность, обладают высокими пластическими

свойствами и низким пределом текучести, а также являются парамагнетиками[7].

В зависимости от добавления различных легирующих элементов в сталь, представляется возможным расширить область существования аустенитной фазы и/или сделать ее более устойчивой. Так, легирование никелем до 10-12%, азотом, углеродом и марганцем в определенном соотношении может в значительной мере способствовать аустенитообразованию в стали и обеспечить стабильность этой фазы. Стоит отметить, что активное легирование нержавеющей аустенитных сталей и воздействие термических обработок при высоких температурах может сопровождаться выделением карбидов  $M_{23}C_6$  из твердого раствора (аустенита) и вызвать уменьшение концентрации легирующих элементов в твердом растворе ниже предела, обеспечивающего коррозионную стойкость (менее 12% Cr), спровоцировать частичные структурные превращения и изменения магнитных свойств стали. Превращения такого типа чаще всего протекают по границам зерен, где происходит наибольшее обеднение твердого раствора по углероду и хромю. Воздействие агрессивных сред для обеденных по углероду и хромю участков в аустенитной стали нежелательно, так как в таких условиях сталь быстро разрушается, вследствие межкристаллитной коррозии [1,6]. Уменьшают склонность к интеркристаллитной и межкристаллитной коррозии путем легирования стали титаном (реже ниобием) в количестве 0.1-0.7% (08X18H10T, 12X18H10T, 12X18H12T). Введение титана или ниобия способствует связующему эффекту для углерода и образованию карбидов типа TiC и NbC, а хром в этом случае остается в твердом растворе [6]. Никель является дорогостоящим легирующим элементом, поэтому его частично заменяют химическим аналогом – марганцем, типичным представителем является сталь марки 20X13H4Г9Т. Сталь такой марки способна работать при низких температурах (до  $-196^{\circ}C$ ), а также в слабоагрессивных средах. Молибден повышает коррозионную стойкость сталей и поэтому широко применяется в высоколегированных ферритных нержавеющей сталях и в хромоникелевых аустенитных нержавеющей сталях.

Легирование нержавеющей стали молибденом снижает склонность к питтинговой коррозии. Кроме того, молибден оказывает значительный упрочняющий эффект для аустенитных сталей [7].

Наиболее используемыми представителями хромоникельмолибденовых сталей являются стали X17H13M2T, X17H13M3T и X17H13M3. Благодаря сочетанию высоких коррозионных и механических свойств эти марки являются перспективными для использования в нефтехимической, нефтедобывающей, химической, судостроительной и др. промышленности. В таблице 1 представлены данные по применению некоторых аустенитных коррозионностойких сталей в разных областях современной промышленности [7].

Таблица 1 – Применение хромоникелевых нержавеющей сталей [7]

Марка	Класс стали	Назначение
12X18H9	аустенитный	Изготовление деталей для работы в агрессивных средах и химической аппаратуры
10X17H13M3T		
20X13H4Г9		Для торгового и пищевого машиностроения
12X17Г9АН4		

## 1.2 Азотирование сталей

Азотирование применяют с целью повышения твердости, износостойкости, усталостной прочности и коррозионной стойкости сталей и сплавов. Химико-термическая обработка (ХТО), при которой происходит диффузионное насыщение поверхностного слоя сталей и сплавов азотом при нагревании в аммиаке, называют азотированием [1,7,8].

Азотированию подвергают стали перлитного, ферритного и аустенитного классов, а также чугуны. Твердость азотированного слоя намного выше, чем цементированной стали— она сохраняется при нагревании до температур 500-550°C, тогда как твердость стали после цементации сохраняется только до 200-225°C [8]. Перед азотированием детали подвергают предварительной термической обработке (закалке и отпуску) и чистовой

обработке. После азотирования детали шлифуют и полируют. По температуре процесса азотирования его подразделяют на два типа: низкотемпературное азотирование при 500-600°C и высокотемпературное азотирование при 600-1200°C для жаропрочных сталей, сплавов и тугоплавких металлов (Ti, Mo, Nb, V и др.) [7,9].

Стальные изделия азотируют в интервале температур 500-620°C в атмосфере частично диссоциированного аммиака. При нагреве аммиак диссоциирует, образуя активный атомарный азот:  $\text{NH}_3 \rightarrow \text{N} + 3/2\text{H}_2$ . Степень диссоциации аммиака  $\alpha=20-60\%$ . Также широкое распространение получили атмосферы, содержащие азот, предварительно диссоциированный аммиак, кислород и разнообразные углеродосодержащие газы. С целью понижения хрупкости азотированного слоя, а также экономии аммиака, азотирование проводят в аммиаке, разбавленном до 70-80 % азотом или азотным газом  $\text{N}_2 + 4\% \text{H}_2$ . Ускорение процесса азотирования обеспечивается посредством введения в аммиачно-водородную атмосферу кислорода, углекислого газа и воздуха.

В системе «Fe – N» при температурах азотирования возможно образование следующих фаз:  $\alpha'$ -фаза – твердый раствор азота в  $\text{Fe}_\alpha$ , азотистый феррит с ОЦК решеткой и периодами  $a=0.28664-0.2877$  нм (в зависимости от содержания азота), максимальная растворимость азота в феррите не превышает 0.10%;  $\gamma$ -фаза – твердый раствор азота в  $\text{Fe}_\gamma$ , азотистый аустенит с ГЦК решеткой ( $a=0.3613-0.3648$  нм), растворимость азота в аустените составляет 2.8%;  $\gamma'$ -фаза – твердый раствор на основе нитрида железа  $\text{Fe}_4\text{N}$  с ГЦК решеткой ( $a=0,3791-0,3801$  нм), с узкой областью гомогенности 5.3-5.75% N; и промежуточная  $\epsilon$ -фаза – твердый раствор на базе нитрида железа  $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$  (гексагональная решетка, параметр решетки  $a=0.2702-0.2764$  нм) с широкой областью гомогенности (4.55–11.1 % N) [1,7,9]. Состав стали, температура азотирования, длительность нагрева, также скорость охлаждения после азотирования определяют формирование структуры диффузионного слоя азотируемой стали. Азотирование стали при температуре 590 °C способствует формированию диффузионного слоя из трех фаз:  $\epsilon$ ,  $\gamma'$  и  $\alpha$  [8]. Поверхностный

слой во время азотирования может обогащаться не только азотом, но и кислородом, водородом и углеродом. Это обеспечивается составом насыщающей атмосферы при азотировании.

Высокой твердостью обладают  $\gamma'$  – фаза и азотистый мартенсит  $\alpha'$ . Легирующие элементы способствуют уменьшению толщины азотированного слоя, но значительно повышают поверхностную твердость, а также твердость по сечению диффузионного слоя [9]. Основную часть слоя составляет зона внутреннего азотирования с высокой твердостью, которая связана с образованием твердого раствора азота в аустените и выделением нитридов легирующих элементов, искажающих решетку матрицы и затрудняющих пластическую деформацию. Азотирование способствует повышению предела усталости конструкционных сталей за счет образования в поверхностном слое остаточных напряжений.

#### *Азотирование коррозионностойких сталей*

Стали с высоким содержанием хрома перед процессом азотирования подвергают обработке, которая заключается в удалении оксидной пленки, которая препятствует насыщению азотом. Оксидную пленку удаляют посредством травления стали в кислотах или различными методами очистки поверхности (гидропескоструйная очистка). Для высокохромистых сталей (20X13) после азотирования твердость поверхностного слоя составляет 1000 HV и постепенно уменьшается по толщине слоя. Стали, при температуре азотирования имеющие гранецентрированную решетку ( $\gamma$  – фаза), азотируются хуже, чем стали с объемноцентрированной решеткой ( $\alpha$  – фаза) [8, 9]. Азотирование высокохромистых сталей с ферритной и аустенитной структурой проводят при температуре 560-600°C с целью повышения их износостойкости. На аустенитных сталях марок 10X18H8 и 08X18H10T твердость поверхностного азотированного слоя составляет 1000 HV [9]. Для сталей аустенитного класса твердость остается почти постоянной по толщине азотированного слоя, но резко снижается при переходе к вязкой сердцевине. Понижение содержания углерода в сталях аустенитного и ферритного классов

обеспечивает повышенную толщину слоя и способствует уменьшению хрупкости азотированного слоя. Повышенные температуры при азотировании способствуют росту общей толщины азотированного слоя, однако толщина зоны твердорастворного упрочнения с увеличением температуры выше 700-800°C значительно уменьшается.

Таким образом, определенные условия эксплуатации требуют создания диффузионного слоя с заданными фазовыми или структурными составляющими, которые определяют работоспособность изделий в режиме изнашивания и воздействия агрессивных сред. В настоящее время широко применяют и совершенствуют технологические варианты процесса диффузионного насыщения азотом сталей и сплавов, разработаны экологичные и ресурсосберегающие технологии, в частности, основанные на применении: низкотемпературной плазмы тлеющего разряда и вакуума, безгенераторных атмосфер, разбавленных азотом и воздухом, кратковременных процессов газового азотирования и др.

### **1.3 Классификация процессов азотирования**

На сегодняшний день известно множество технологических вариантов процесса азотирования. Их классифицируют по:

- составу среды: в газах, жидких и твердых средах (порошки и пасты);
- температуре процесса  $t$ : низкотемпературные ( $t < A_1$  в системе Fe-N); среднетемпературные ( $t > A_1$  в системе Fe-N, но  $t < A_1$  в системе Fe-C); высокотемпературные ( $t > A_1$  в системе Fe-N);
- диффундирующему элементу – азотирование, карбоназотирование, оксиазотирование, сульфозотирование;
- давлению в реакторе: азотирование при высоком, низком и пульсирующем давлении;
- способу подвода энергии: нагрев за счет конвекции, излучения, низкотемпературной плазмы, лазерного нагрева;
- структуре получаемых слоев в стали;

— комбинациям технологических процессов [8].

Активно используют процессы низкотемпературного азотирования, поскольку такое азотирование снижает деформацию деталей и расход энергии при обработке.

Развитие современной промышленности сопровождается повышением требований к подбору материалов в зависимости от поверхностных свойств, диффузионного слоя и сечения деталей. Важным аспектом является применение экологичных и экономичных технологий, позволяющих регулировать процесс азотирования в широком интервале режимов. Одним из таких методов является метод вакуумного ионного азотирования. Предварительная обработка (закалка сердцевины деталей) и получение модифицированной структуры перед процессом азотирования позволяет в значительной мере облегчить процесс азотирования и добиться заданных свойств металлов и сплавов [8, 10].

#### **1.4 Ионное азотирование в тлеющем разряде**

Азотирование в тлеющем разряде по сравнению с традиционным азотированием в печах имеет ряд достоинств, а именно: высокую скорость диффузионного насыщения, получение многослойной структуры с заданным фазовым составом и строением, возможность управления процессом азотирования, сокращает длительность и упрощает технологический процесс, а также, ионное азотирование позволяет достигнуть высокого класса чистоты поверхности азотированных деталей. Азотирование в тлеющем разряде является наиболее экологичным процессом, чем азотирование в печах, так как процесс в первом случае не токсичен и соответствует требованиям по защите окружающей среды [8, 10, 11].

В атмосфере аммиака, азота или смесей газов азота и водорода при давлении 133-655 Па, рабочем напряжении 350-550 В и температуре 470-600°C осуществляется ионное азотирование в тлеющем разряде, возбуждаемом на поверхности детали (катоде). При бомбардировке катода кинетическая энергия

иона расходуется на нагрев поверхности до температуры насыщения и отрыв электронов и атомов железа, происходит катодное распыление. Для стабилизации горения тлеющего разряда азотирование проводят при пониженном давлении [9, 10, 12].

Обычно процесс азотирования в тлеющем разряде реализуют в две последовательные стадии: очистка поверхности благодаря катодному распылению и вторая стадия – азотирование. Вакуумные и электрические параметры разряда при катодном распылении позволяют добиться активации поверхности и одновременно разрушают оксидные пленки на поверхности, а вторая стадия, в свою очередь, обеспечивает нагрев поверхности до температуры диффузии и насыщения азотом металла или сплава. Возбуждение тлеющего разряда приводит к тому, что к поверхности детали, которая служит катодом, устремляется поток ионов азота с положительным зарядом. Удары ионов о катод сопровождаются выделением тепла, за счет которого разогревается поверхность детали [9,13,14].

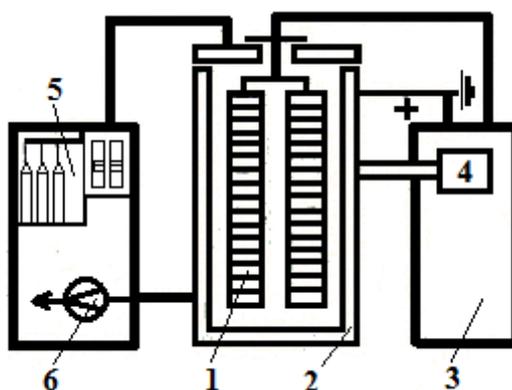


Рисунок 1 – Схема установки для ионного азотирования: 1 – детали, 2 – вакуумный контейнер, 3 – блок электропитания, 4 – прибор для регулирования температуры, 5 – газовая гребенка, 6 – вакуумный насос [9]

Примитивные установки для осуществления процесса ионного азотирования обычно состоят из рабочей вакуумной камеры, служащей анодом, в которую помещают деталь – катод, вакуумной системы,

газоприготовительной установки, блоков управления и питания. Схема установки представлена на рисунке 1.

Технологический процесс ионного азотирования включает в себя следующие операции:

1. Обезжиривание деталей;
2. Установка деталей в вакуумную камеру на специальные приспособления;
3. Очистка поверхности с помощью катодного распыления. Распыление проводится в зависимости от качества поверхности детали в течение 15-40 мин., при давлении 130-1330 Па и при напряжении 400-1100 В, а температура не превышает 250°C;
4. Обеспечение заданной температуры азотирования и собственно выдержка для получения требуемой толщины слоя. При этом давление в процессе насыщения составляет 400-650 Па, напряжение 350-550 В. Охлаждение деталей осуществляется при пониженных давлениях (13-60 Па) и температуре 150-200 °С, в течение 1-2 ч.

Практически все коррозионностойкие стали могут азотироваться в плазме тлеющего разряда [8–10, 13–15]. Для нержавеющей сталей температуру ионного азотирования выбирают в интервале температур 530-580°C, продолжительность процесса составляет от 10 до 24 ч. и определяется требуемыми на выходе детали параметрами – толщиной азотированного слоя и толщиной слоя внутреннего азотирования [16].

### **1.5 Ионное азотирование с применением эффекта полого катода**

С целью интенсификации процессов диффузии и увеличения скорости насыщения ионами азота обрабатываемой поверхности применяют относительно недавно разработанный и внедренный технологический процесс ионного азотирования в тлеющем разряде с эффектом полого катода (ЭПК)[17,18].

В работах ученых Ю. Е. Крейнделя, В. В. Будилова, Р. Д. Агзамова, К. Н. Рамазанова было экспериментально доказано, что использование ЭПК при ионном азотировании в тлеющем разряде обеспечивает более высокую скорость диффузионного насыщения по сравнению с обработкой в традиционном тлеющем разряде за счет снижения давления насыщающего газа [19, 20].

Сущность способа ионного азотирования с применением ЭПК заключается в том, что на расстоянии 5...7 мм от обрабатываемой поверхности устанавливается специальный экран в виде сетки. Деталь и экран в виде сетки являются катодами в установке и образуют между собой полость, где формируется плазма с повышенной концентрацией заряженных частиц. Схема установки, с помощью которой возможно осуществление процесса ионного азотирования с ЭПК, представлена на рисунке 2.

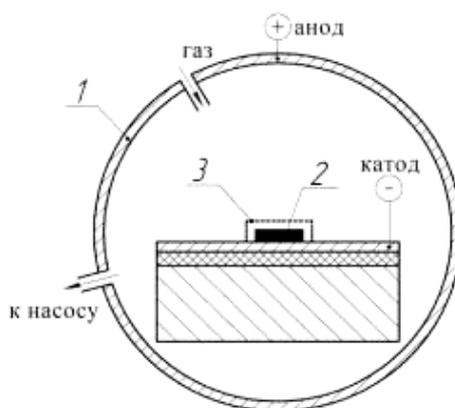


Рисунок 2 – Схема установки для ионного азотирования с ЭПК: 1 – вакуумная камера, 2 – обрабатываемая деталь, 3 – технологический экран [21]

Напряжение между электродами, состав газовой среды, степень разрядения газовой среды, рабочая температура и длительность процесса, расстояние между деталью и технологическим экраном – все эти условия в совокупности являются параметрами режимов ионного азотирования с

эффектом полого катода и обеспечивают необходимое строение и свойства упрочненного слоя азотируемых деталей.

Для обеспечения оптимальных параметров ионного азотирования с ЭПК Будиловым В.В. и Рамазановым К.Н. был проведен ряд экспериментов для определения диапазонов давления и напряжения, при которых возможно существование такого эффекта. На основании полученных вышеприведенными авторами данных была построена диаграмма, приведенная на рисунке 3 [21].

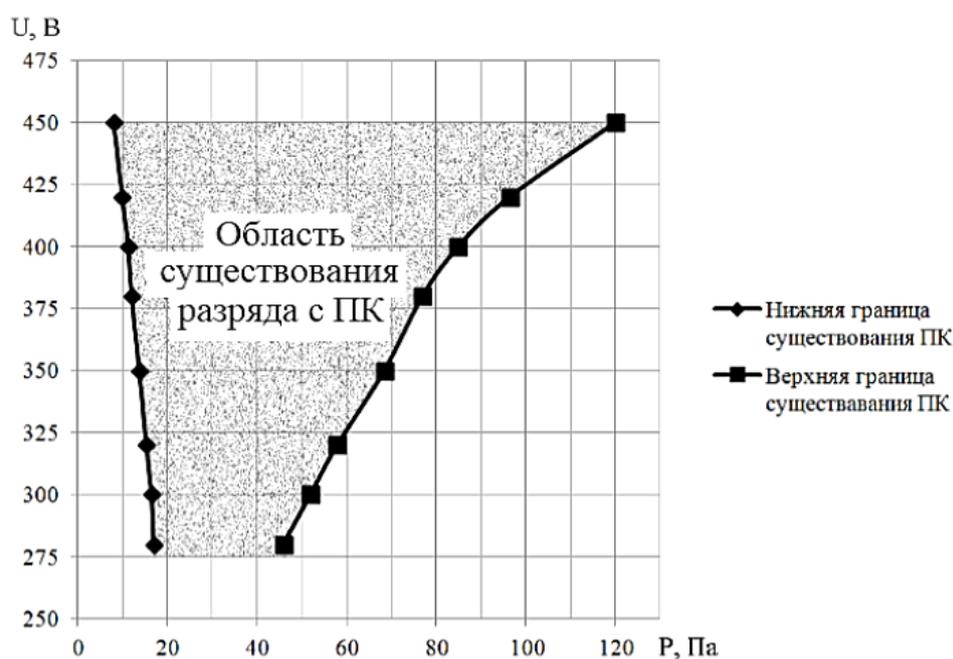


Рисунок 3 – Область существования тлеющего разряда с эффектом полого катода [21]

Авторы в работе [21] также показали, что на основании диаграммы области существования тлеющего разряда с ЭПК (рисунок 3) определяется диапазон давлений и напряжений, при которых возможна обработка с применением ЭПК. Полученные данные позволяют выбрать режим обработки таким образом, чтобы максимально уменьшить расход насыщающих газов. Оптимальной рабочей температурой для ионного азотирования с ЭПК является температура 550°С, давление – 60 Па. При понижении давления (ниже 60 Па) энергия ионов рабочей газа недостаточна для нагрева обрабатываемой детали

до рабочей температуры. При повышении давления (выше 60 Па) возникает опасность перегрева деталей и возникновения на поверхности оплавленных участков. Рабочий газ при азотировании с ЭПК – смесь аргона, азота и ацетилена ( $\text{Ar}$  70 %,  $\text{N}_2$  25 %,  $\text{C}_2\text{H}_2$  – 5%). В вакуумной камере недопустимо присутствие кислорода, так как он уменьшает активность рабочей атмосферы. Добавление  $\text{C}_2\text{H}_2$  в рабочий газ обеспечивает регулирование состава нитридной зоны по углероду [8, 9, 21]. В зависимости от требуемой толщины диффузионного слоя выбирается длительность процесса азотирования.

### **1.6 Особенности структуры и свойств коррозионностойких сталей, подвергнутых ионному азотированию**

Аустенитные хромоникельмолибденовые стали нашли широкое применение во многих отраслях современной промышленности благодаря высокой устойчивости к коррозии и технологичности. Однако их значительным недостатком являются низкие прочностные свойства [6 – 8]. Для повышения прочностных и трибологических свойств аустенитных сталей в последнее время широко применяют комбинацию методов термических и термомеханических обработок, для поверхностного упрочнения используют методы ионного азотирования.

Эффективность процесса азотирования определяется концентрацией активных частиц на поверхности, а также скоростью диффузии азота в объеме материала и в приповерхностных слоях. Она зависит от энергии активации диффузионного процесса и увеличивается с ростом температуры насыщаемого металла или сплава. Авторами в работе [22] показано, что при азотировании коррозионностойкой стали AISI-304 при температурах менее  $450^\circ\text{C}$  формируется метастабильная фаза твердого раствора азота с высокой твердостью от 12–15 ГПа. Азотирование при более высоких температурах позволяет сформировать в приповерхностном слое аустенитной стали нитриды хрома [23]. Эффективно упрочнить и одновременно достичь удовлетворительного качества поверхности после низкотемпературного ионно-

плазменного азотирования стали 12X18H10T ( $T_A=350^\circ\text{C}$ ) удалось авторам работы [24], однако при азотировании аустенитной стали с крупнокристаллической структурой при данной температуре обеспечивается существенно меньшая толщина азотированного слоя по сравнению с азотированием при  $T_A \geq 400^\circ\text{C}$ . По этой причине, чтобы не снижать эффективность упрочнения поверхности, базовый материал необходимо подвергнуть предварительной обработке. Авторами в работе [25] установлено, что формирование наноструктурированного слоя на поверхности ОЦК-железа позволяет понизить температуру азотирования в газовой среде до  $300^\circ\text{C}$ . Этот эффект достигнут за счет повышенной диффузии азота в наноструктурированном слое по сравнению с крупнокристаллической матрицей.

В работе [26] выявлено, что при низкотемпературном ионном азотировании стали Fe-0.4C-1.0Cr происходит формирование многослойной структуры. При этом многослойное строение модифицированного слоя отражает последовательную перестройку структурно-фазового состояния стали в процессе азотирования. Такой эффект достигается в результате насыщения азотом при температуре  $200^\circ\text{C}$  в течении 2, 4, 6 и 8 часов в плазме дугового разряда. Аналогичные результаты были получены при ионно-лучевом азотировании аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T в результате ионной имплантации азотом при температуре выше  $400^\circ\text{C}$ . В модифицированном слое аустенитной стали образуются наноразмерные частицы CrN и  $\alpha\text{-Fe}$ , приводящие к существенному упрочнению слоя и придающие ему ферромагнитные свойства [27].

Авторами работы [28] показано, что при высокоинтенсивной низкоэнергетической имплантации ионами азота и азотировании в плазме дугового разряда низкого давления в температурном интервале от  $200^\circ\text{C}$  до  $400^\circ\text{C}$  в легированных хромом сталях 40X и 20X13 формируется поверхностный упрочненный слой, строение и фазовый состав которого задаются температурой процесса и исходным структурным состоянием стали.

После ультразвукового модифицирования в стали формируется нитридный слой близкой морфологии, но с увеличенными объемной долей нитридов и глубиной упрочненного слоя. Увеличение глубины упрочненного слоя происходит за счет диффузии атомов азота по дефектам структуры – дислокациям, границам субзерен и зерен.

Зарубежными авторами также достигнуты определенные успехи при азотировании сталей и сплавов. W.P. Tong и соавторы [29] экспериментально показали эффективность предварительной механической обработки стали перед процессом азотирования. Авторами в работе [29] показано, что после наноструктурирования и последующего низкотемпературного азотирования при 400°C в стали Fe-0.32Mn-1.8Cr-0.2Mo-0.98Al-0.37C образуется слой из наноструктурных нитридов, которые в значительной степени повышают твердость и износостойкость стали. Формирование наноразмерной структуры в стали с большим количеством дефектов, границ зерен и дислокаций позволяет формировать «ловушки» для образования нитридов, которые в значительной степени повышают атомную диффузию и облегчают процесс азотирования, в частности, позволяют снизить его температуру.

Таким образом, комбинируя различные методы предварительной модификации поверхности и последующее ионное азотирование, представляется возможным получить композиционный материал с высокими прочностными характеристиками и управляемыми параметрами азотированного слоя.

## **2 Постановка задач исследования и методика эксперимента**

### **2.1 Постановка задач исследования**

Азотирование является эффективным методом химико-термической обработки, с помощью которого представляется возможным обеспечить высокий комплекс эксплуатационных свойств обрабатываемых сталей и сплавов: твердость, износостойкость, противозадирные свойства и усталостную прочность. Результатом обогащения поверхности стали ионами азота является формирование упрочненного поверхностного слоя и образование нитридов, а также значительное повышение коррозионной стойкости материала. Одной из фундаментальных научных проблем в данной области является установление закономерностей диффузионных процессов и механизмов формирования сверхтвердых фаз при ионном азотировании аустенитных сталей и поиск путей улучшения характеристик модифицированных слоев при вариации параметров ионного азотирования. Авторами работ [2–4, 25–29] показана высокая эффективность применения предварительной модификации поверхности и последующего азотирования сталей с целью повышения прочностных и трибологических характеристик. Вышеупомянутые исследования показывают хорошую перспективу использования методов ионного азотирования для формирования градиентных материалов с задаваемыми функциональными свойствами, при этом появляется возможность существенно понизить энергоемкость процесса по сравнению с традиционным диффузионным насыщением материалов азотом. На сегодняшний день исследований по влиянию низкотемпературного ионного азотирования с эффектом полого катода на физико-механические характеристики аустенитных сталей не много.

Настоящая ВКР направлена на установление влияния термомеханической обработки на закономерности упрочнения, деформации и механизма разрушения аустенитной нержавеющей стали 01X17H13M3 при низкотемпературном ионном азотировании и выявление корреляции между

исходной микроструктурой аустенитной нержавеющей стали (базового материала) и параметрами азотированного слоя.

Для достижения поставленной цели в работе были сформулированы следующие задачи исследования:

1. Установить влияние исходного структурного состояния аустенитной стали 01X17H13M3 (субмикроструктурное, мелко- и крупнокристаллическое) на параметры формирования азотированного слоя и его структурно-фазовые характеристики.

2. Выявить влияние давления насыщающего газа на закономерности формирования упрочненного слоя в стали 01X17H13M3 с разным размером зерна.

3. Исследовать механические свойства, параметры упрочнения и разрушения стали 01X17H13M3 при растяжении образцов, подвергнутых ионному азотированию, в зависимости от исходной обработки стали.

## 2.2 Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования была выбрана стабильная, хромоникельмолибденовая аустенитная сталь марки 01X17H13M3, химический состав стали приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Химический состав стали 01X17H13M3 (мас.%)

Fe	Cr	Ni	Mn	Mo	Si	C	P	Al	V	Cu	W	N	Ti
Ост.	17	13	1.7	2.7	0.6	0.01	0.01	0.02	0.05	0.02	0.02	0.05	<0.01

Сталь подвергали термомеханическим обработкам по нескольким режимам: режим 1 – прокатка до степени осадки 80% при комнатной температуре, режим 2 – прокатка до 80% при комнатной температуре и отжиг при температуре 600°C (2 ч.), режим 3 – прокатка до 80% при комнатной температуре и отжиг при 900°C (2 мин.), режим 4 – прокатка до 80% при комнатной температуре и отжиг при 1000°C (7 мин.) и режим 5 – прокатка до

40% при комнатной температуре и отжиг при 1050°C (5 ч.). Температура отжига при режиме 2 была выбрана немного выше температуры азотирования, чтобы структурные превращения из-за разогрева образца при азотировании были сведены к минимуму. Такой подход позволил при сопоставлении режимов 1 и 2 исключить влияние нагрева во время азотирования на особенности структуры образца. После термических обработок стальные образцы закаливали в воду.

Из заготовок, подвергнутых термомеханическим обработкам, вырезали образцы в форме двойных лопаток с размерами рабочей части 1.7×2.7×18 мм. Стальные лопатки шлифовали, электролитически полировали и подвергали ионному азотированию при температуре 540°C в течение 12 часов. В качестве рабочего газа использовали смесь аргона, азота и ацетилена (Ar 70%, N<sub>2</sub> 25%, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 5%). Ионное азотирование образцов проводили по двум режимам: традиционное ионное азотирование (ТИА) при давлении рабочего газа P=300 Па и ионное азотирование с эффектом полого катода (ЭПК) при P=60 Па [21]. Использование эффекта полого катода позволило изучить влияние давления насыщающего газа на закономерности формирования упроченного слоя. Ионное азотирование осуществляли с применением модернизированной установки ЭЛУ-5М (Уфа, УГАТУ).

После ионного азотирования стальные образцы подвергали одноосному растяжению при комнатной температуре с относительной скоростью деформации  $4.6 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ . Растяжение проводили на электромеханической измерительной системе для проведения статических испытаний Instron 3369.

Морфологию поверхности разрушенных образцов и поверхности разрушения исследовали с использованием растрового электронного микроскопа LEO EVO 50 (Zeiss, Germany).

Структурные исследования проводили с использованием просвечивающего электронного микроскопа JEM 2100 при ускоряющем напряжении 200 кВ. Образцы были подготовлены в виде дисков диаметром ~3 мм, диски утоняли механической шлифовкой до 100÷150 мкм, а затем струйной полировкой в охлажденном электролите (состав электролита– 95%

ледяной уксусной кислоты ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) + 5% хлорной кислоты ( $\text{H}_3\text{ClO}_4$ ) до получения тонких участков, пригодных для электронно-микроскопического анализа. Средний размер зерен и элементов структуры рассчитывали методом секущих по оптическим и темнопольным электронно-микроскопическим изображениям [30]. Индицирование микроэлектроннограмм осуществляли стандартным способом, подробно изложенным в [30].

Рентгеновские исследования выполнены на дифрактометре ДРОН-7 в  $\text{CoK}_\alpha$  излучении. Расчет микродеформации кристаллической решетки  $\Delta d/d$  и размеров областей когерентного рассеяния  $D_{\text{hkl}}$  (ОКР) выполняли методом аппроксимации [31].

Микротвердость стальных образцов измеряли по методу Виккерса с использованием прибора ПМТ-3М при нагрузке на индентор 10 г.

Исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» (Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск).

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
4Б21	Москвиной Валентине Александровне

<b>Институт</b>	Физики высоких технологий	<b>Кафедра</b>	Материаловедения в машиностроении
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	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	При проведении исследования используется база лабораторий центра коллективного пользования «Нанотех» ИФПМ СО РАН. В исследовании задействованы 2 человека: студент-исполнитель и научный руководитель. Приблизительная сумма затрат на выполнение проекта составляет 600 тысяч рублей.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность». Минимальный размер оплаты труда на 2016 год составляет 6675 руб.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления по страховым взносам - 30% от ФОТ.

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Определение потенциальных потребителей результатов исследования. Определение научно-технической эффективности проекта. SWOT-анализ.
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Определение трудоемкости выполнения работ. Разработка графика проведения НИР. Расчет материальных затрат НИР.
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Оценка научно-технического уровня НИР.

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. График проведения и бюджет НИР (график Ганта);
2. Оценка ресурсной и финансовой эффективности НИР;
3. Матрица SWOT.

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры менеджмента	Грахова Елена Александровна			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Б21	Москвиной Валентина Александровна		

## **4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Целью данного раздела является оценка коммерческого и инновационного потенциала научно-исследовательской работы (НИР), планирование процесса управления НИР, определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности.

### **4.1 Технико-экономическое обоснование научно - исследовательской работы**

Настоящая ВКР рассматривает научно-исследовательскую задачу по изучению влияния ионного азотирования на аустенитную сталь. Азотирование является широко используемым промышленным методом создания композиционных материалов с поверхностно упрочненным слоем и вязкой матрицей, в которых повышенные прочностные и трибологические свойства сочетаются с высокой устойчивостью к коррозии. Актуальной проблемой на сегодняшний день является сокращение длительности процесса азотирования и уменьшение расхода распыляемого газа. Ионное азотирование позволяет снизить время обработки материала по сравнению с азотированием в газе, дает перспективу получения материалов с контролируемыми параметрами азотированного слоя при относительно низких температурах.

### **4.2 Потенциальные потребители результатов исследования**

*Целевой рынок.* Исследования, применяемые в дипломной работе, а также полученные результаты будут интересны машиностроительным, судостроительным, авиастроительным и прочим предприятиям, использующим в своем производстве детали из стали, а также интерес к данным исследованиям, возможно, будет актуален для Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ).

### **4.3 Планирование работ по НИР**

В данном разделе необходимо составить перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, провести распределение

исполнителей по видам работ. Порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 5.

Таблица 5 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб.	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка задания на НИР	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель, студент
Выбор направления исследований в НИР	2	Подбор и изучение литературных данных по теме	Студент
	3	Выбор направления исследований	Научный руководитель
	4	Календарное планирование работ по теме	Научный руководитель, студент
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Научный руководитель, студент
	6	Подготовка образцов и проведение экспериментов	Научный руководитель, студент
	7	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	Научный руководитель, студент
Обобщение и оценка результатов	8	Оценка эффективности полученных результатов	Научный руководитель, студент
	9	Определение целесообразности проведения НИР	Научный руководитель, студент
Изготовление и испытание опытного образца	10	Конструирование и изготовление опытного образца	Научный руководитель, студент
	11	Лабораторные испытания образца-макета	Научный руководитель, студент
Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ОКР)	12	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Студент

#### 4.4 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от большого количества учитываемых факторов. Для определения

ожидаемого (среднего) значения трудоемкости  $t_{ожі}$  используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5},$$

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

$t_{mini}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{maxi}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

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

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i},$$

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

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

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

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал},$$

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

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

$k_{кал}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}},$$

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

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

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

$$k_{\text{кал}} = \frac{366}{366 - 109 - 10} = 1.48 \approx 2$$

Все рассчитанные значения необходимо свести в таблицу 6.

Таблица 6 – Временные показатели проведения научного исследования

№ п.	Название работы	Трудоемкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$	Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$
		$t_{\text{min}}$ , чел-дни	$t_{\text{max}}$ , чел-дни	$t_{\text{ож}}$ , чел-дни			
1	Составление и утверждение технического задания	1	2	1	Научный руководитель, студент	1	2
2	Подбор и изучение литературы по теме	20	28	23	Студент	5	10
3	Выбор направления исследований	1	2	1	Научный руководитель	1	2
4	Календарное планирование работ	3	5	4	Научный руководитель	1	2
5	Проведение теоретических расчетов	28	45	35	Научный руководитель, студент	7	14
6	Подготовка образцов и проведение экспериментов	30	45	36	Научный руководитель, студент	10	20
7	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	24	28	26	Научный руководитель, студент	5	10
8	Оценка эффективности полученных результатов	10	14	12	Научный руководитель, студент	2	4
9	Определение целесообразности проведения ОКР	12	14	13	Научный руководитель, студент	3	6
10	Конструирование и изготовление макета	7	14	10	Научный руководитель,	2	4

	опытного образца				студент		
11	Лабораторные испытания образца	24	28	26	Научный руководитель, студент	5	10
12	Составление пояснительной записки	28	30	29	Студент	6	12
Итого							96

#### 4.5 Построение графика работ

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

На основе таблицы 6 строится календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта на основе таблицы 3 с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица 7 – Календарный план-график проведения НИР

№ раб	Вид работ	Исполнители	Т <sub>кi</sub> кал. дн.	Продолжительность выполнения работ																
				январь			февраль			март			апрель			май				
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель, студент	2	█																
2	Выбор направления исследований	Научный руководитель	2	█																
3	Календарное планирование работ по теме	Научный руководитель	2		█															
4	Подбор и изучение материалов по теме	Студент	10			▨	▨	▨	▨											
5	Проведение	Научный	14																	

	теоретических расчетов	руководитель, студент																	
6	Построение макетов(моделей) и проведение экспериментов	Научный руководитель, студент	20																
7	Определение целесообразности проведения ОКР	Научный руководитель, студент	6																
8	Конструирование и изготовление макета (опытного образца)	Научный руководитель, студент	4																
9	Лабораторные испытания макета	Научный руководитель, студент	10																
10	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	Научный руководитель, студент	10																
11	Оценка эффективности полученных результатов	Научный руководитель, студент	4																
12	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Студент	12																

 – руководитель;  – студент

Составлен план НИ, в котором разработан календарный план. Общее содержание работ для проведения исследования составило 12 позиций. Для построения таблицы временных показателей проведения НИР был рассчитан коэффициент календарности. С помощью данных показателей был разработан календарный - план график проведения НИР по теме. Для иллюстрации календарного плана была использована диаграмма Ганта, что указывает на целесообразность проведения данного исследования.

#### 4.6 SWOT-анализ исследования

Базовым рынком сбыта продукции является рынок Российской Федерации и СНГ, в перспективе планируется выход на международные рынки.

Успех в достижении целей НИР обеспечивается получением синергетических эффектов выгоды от вертикальной интеграции, выгоды от диверсификации, от доступа к новым каналам сбыта продукции и технологиям, увеличение доли на рынке. Анализ реализации проекта SWOT представлен в таблице 8.

Таблица 8 – SWOT анализ проекта

Сильные стороны	Возможности во внешней среде
<p>С1. Простота использования метода.</p> <p>С2. Большой объем и доступность сырья (сталь 01Х17Н13М3 и азота (аммиака));</p> <p>С3. Есть спрос по разрабатываемой теме;</p> <p>С4. Экологичность технологии. Не несет каких-либо вредных воздействий на окружающую среду;</p> <p>С5. Невысокая стоимость исходного сырья.</p>	<p>В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ;</p> <p>В2. Использования современного оборудования ЦКП «Нанотех» ИФПМ СО РАН;</p> <p>В3. Возможность выхода на рынок и начала поставок;</p> <p>В4. Возможность поддержания проектов РФФИ.</p>
Слабые стороны	Угрозы внешней среды
<p>Сл1. Необходимо четко следовать инструкции;</p> <p>Сл2. Небольшое количество потенциальных потребителей;</p> <p>Сл3. Для точности и подтверждения полученных данных и последующей верной интерпретации необходимо подготавливать несколько образцов, что делает процесс исследованием немного дольше.</p>	<p>У1. Появление новых конкурентов;</p> <p>У2. Появление производителей с более развитыми технологиями и низкими издержками;</p> <p>У3. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства;</p> <p>У4. Изменения направления работы лаборатории.</p>
<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и угрозы»</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и угрозы»</p>
<p>1. Небольшие издержки изготовления образцов;</p> <p>2. Высокая конкурентоспособность технологии позволит привлечь дополнительное финансирование со стороны частных лиц в случае несвоевременного государственного финансирования;</p> <p>3. Отсутствие спроса на новые технологии производства не значительно окажут негативное влияние на проект;</p> <p>4. Достижение высоких физико - механических свойств стали обеспечит спрос на местном рынке.</p>	<p>1. Появление конкурентов с новейшими разработками, с развитыми научно-исследовательскими институтами;</p> <p>2. При отсутствии спроса на новые технологии производства может послужить то, что у потенциальных потребителей не имеется квалифицированных кадров по работе с научной разработкой;</p> <p>3. Несвоевременное финансовое обеспечение исследования со стороны государства и введения дополнительных требований к сертификации продукции</p>

	может усложнить процесс перехода к массовому производству.
--	------------------------------------------------------------

Проанализировав основные критерии сравнения, можно сделать вывод, что разрабатываемое нами исследование по азотированию коррозионностойких сталей будет особенно интересно машиностроительным предприятиям и заводам, за счет достижения уникальных физико-механических свойств в стали. Доступность исходного сырья и экологичность процесса, также являются благоприятными факторами для внедрения на рынок результатов данного исследования.

#### **4.7 Бюджет научно-технического исследования (НИР)**

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

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

##### **4.7.1 Расчет материальных затрат НИР**

Данная статья включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта:

- приобретение со стороны сырья и материалов, необходимых для создания научно-технической продукции;

- покупные материалы, используемые в процессе создания научно-технической продукции для обеспечения нормального технологического процесса;
- покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, подвергающиеся в дальнейшем монтажу или дополнительной обработке;
- сырье и материалы, покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, используемые в качестве объектов исследований и для эксплуатации технического обслуживания – объектов испытаний;

В материальные затраты, помимо вышеуказанных, включаются дополнительно затраты на канцелярские принадлежности, диски, картриджи и т.п. Их учет ведется в данной статье только в том случае, если в научной организации их не включают в расходы на использование оборудования или накладные расходы. В первом случае на них определяются соответствующие нормы расхода от установленной базы. Во втором случае их величина учитывается как некая доля в коэффициенте накладных расходов.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) + \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расxi},$$

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расxi}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м,  $m^2$  и т.д.);

$C_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./ $m^2$  и т.д.);

$k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Величина коэффициента ( $k_T$ ), отражающего соотношение затрат по доставке материальных ресурсов и цен на их приобретение, зависит от условий договоров поставки, видов материальных ресурсов, территориальной

удаленности поставщиков и т.д. Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 9.

Таблица 9 – Материальные затраты на НИР (руб.)

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (З <sub>м</sub> ), руб.
Сталь 01X17H13M3	тонн	1	35000	42 000
Итого				42 000

Из затрат на материальные ресурсы, включаемых в себестоимость продукции, исключается стоимость возвратных отходов.

#### 4.7.2 Основная заработная плата исполнителей НИР

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок.

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

$$Z_{zn} = Z_{ocn} + Z_{доп}$$

где  $Z_{ocn}$  – основная заработная плата;

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата (12-20% от  $Z_{ocn}$ ).

Основная заработная плата ( $Z_{ocn}$ ) руководителя от предприятия рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{ocn} = Z_{дн} \cdot T_p,$$

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

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, р. дней (таблица 2);

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_M \cdot M}{F_{\text{д}}},$$

где  $Z_M$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года;

$F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, р. дней (таблица 10).

Таблица 10 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	366	366
Количество нерабочих дней:		
- выходные дни	102	54
- праздничные дни	16	12
Потери рабочего времени:		
- отпуск	28	28
- невыходы по болезни	0	0
Действительный годовой фонд рабочего времени	220	272

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_M = Z_{mc} \cdot (1 + k_{np} + k_{\text{д}}) \cdot k_p,$$

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

$k_{np}$  – премиальный коэффициент, равный 0.3 (т.е. 30% от  $Z_{mc}$ );

$k_{\text{д}}$  – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0.2 – 0.5 ( в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20% от  $Z_{mc}$ );

$k_p$  – районный коэффициент, равный 1.3 (для Томска).

Таблица 11 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	Разряд	$k_m$	$Z_{mc}$ , руб.	$k_{np}$	$k_{\text{д}}$	$k_p$	$Z_M$ , руб.	$Z_{\text{дн}}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$Z_{\text{осн}}$ , руб.
Руководитель	13	9,3	5580	0.3	0.4	1.3	12332	631	45	34074
Студент	1	1.2	720	0.3	0.4	1.3	1591	81	34	3305
Итого $Z_{\text{осн}}$										37379

Тарифная заработная плата  $Z_{mc}$  находится из произведения тарифной ставки работника 1-го разряда  $T_{ci} = 600$  руб. на тарифный коэффициент  $k_m$  и учитывается по единой для бюджетных организаций тарифной сетке. Расчет основной заработной платы приведен в таблице 11.

Основная заработная плата руководителей рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда, которая предполагает состав заработной платы:

- 1) Оклад – определяется предприятием. Оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, старший преподаватель, доцент, профессор.
- 2) Стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд и т.д.
- 3) Иные выплаты; районный коэффициент.

#### **4.7.3 Дополнительная заработная плата исполнителей темы**

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{дон} = k_{дон} \cdot Z_{осн},$$

где  $k_{дон}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0.12 – 0.15).

$$Z_{дон\ p1} = 34074 \cdot 0,15 = 5111 \text{ руб.}$$

$$Z_{дон\ см} = 3305 \cdot 0,15 = 496 \text{ руб.}$$

$$Z_{дон} = 5111 + 496 = 5607 \text{ руб.}$$

#### 4.7.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}),$$

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

Отчисления во внебюджетные фонды рекомендуется представлять в табличной форме (таблица 12).

Таблица 12 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнители	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды
Руководитель	34074	5111	10580
Студент	3305	496	1026
		Итого	11606

#### 4.7.5 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовый и телеграфный расходы и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{накл} = (\text{сумма статей } 1 \div 4) \cdot k_{нр},$$

где  $k_{нр}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов в размере 16%.

$$Z_{накл} = (42000 + 37379 + 5607 + 11606) \cdot 0.16 = 15455 \text{ руб.}$$

#### 4.7.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основной для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Определение бюджета затрат на НИР приведет в таблице 13.

Таблица 13 – Расчет бюджета затрат НИР

Наименование статьи	Сумма, руб.	Примечание
1. Материальные затраты НИР	42000	Пункт 4.7.1
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей проекта	37379	Пункт 4.7.2
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	5607	Пункт 4.7.3
4. Отчисления во внебюджетные фонды	11606	Пункт 4.7.4
5. Накладные расходы	15455	16% от суммы ст. 1-4
6. Бюджет затрат НИР	112047	Сумма ст. 1-5

Расчет произведен с учетом работы в 1 месяц. Общая продолжительность исследования составляет 3 месяца. Согласно смете затрат на проектирование, наибольшие затраты идут на заработную плату научно-производственного персонала и материальные затраты, в 1 рабочий месяц 112047 тысяч рублей. Данный уровень расходов соответствует текущему уровню затрат на научно-исследовательскую работу.

#### 4.8 Оценка научно-технического уровня НИР

Важнейшим результатом проведения НИР является его научно-технический уровень, который характеризует, в какой мере выполнены работы и обеспечивается ли научно-технический прогресс в данной области. В последнее время для оценки научной ценности, технической значимости и эффективности, планируемых и выполняемых НИР, получил распространение метод бальных оценок. Бальная оценка заключается в том, что каждому фактору по принятой шкале присваивается определенное количество баллов. Обобщенную оценку проводят по сумме баллов по всем показателям или рассчитывают по

формуле. На этой основе делается вывод о целесообразности НИР. Сущность метода заключается в том, что на основе оценок признаков работы определяется коэффициент ее научно-технической уровня по формуле [4]:

$$H_T = \sum_{i=1}^3 R_i \cdot n_i$$

где  $H_T$  — показатель, определенный по трем признакам;

$R_i$  — весовой коэффициент  $i$ -го признака научно-технического эффекта;

$n_i$  — количественная оценка  $i$ -го признака научно-технического эффекта, в баллах (таблица 14, 15).

Таблица 14 – Весовые коэффициенты признаков НТУ

Признак НТУ	Примерное значение весового коэффициента
1. Уровень новизны	0.5
2. Теоретический уровень	0.3
3. Возможность реализации	0.2

Таблица 15 – Баллы для оценки уровня новизны

Уровень новизны	Характеристика уровня новизны	Баллы
Принципиально новая	Новое направление в науке и технике, новые факты и закономерности, новая теория, способ	8-10
Новая	По-новому объясняются те же факты, закономерности, новые понятия, дополняют ранее полученные результаты	5-7
Относительно новая	Систематизируются, обобщаются имеющиеся сведения, новые связи между известными факторами	2-4
Не обладает новизной	Результат, который ранее был известен	0

Таблица 16 – Баллы значимости теоретических уровней

Теоретический уровень полученных результатов	Баллы
1. Установка закона, разработка новой теории	10
2. Глубокая разработка проблемы, многоспектральный анализ, взаимодействия между факторами с наличием объяснений	8
3. Разработка способа (алгоритм, программа и т. д.)	6
4. Элементарный анализ связей между фактами (наличие гипотезы, объяснения версии, практических рекомендаций)	2

5. Описание отдельных элементарных факторов, изложение наблюдений, опыта, результатов измерений	0.5
-------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Результаты оценок признаков отображены в таблице 17.

Таблица 17 – Количественная оценка признаков НИОКР

Признак научно-технического эффекта НИР	Характеристика признака НИОКР	$K_i$	$P_i$
1. Уровень новизны	По-новому объясняются те же факты, закономерности, новые понятия	0.5	6
2. Теоретический уровень	Разработка способа (алгоритм, программа мероприятий, устройство, вещество и т.п.)	0.3	8
3. Возможность реализации	Время реализации в течение первых лет	0.2	8
4. Масштабы реализации	Одно или несколько предприятий	0.2	2

Используя исходные данные по основным признакам научно-технической эффективности, определяем показатель научно-технического уровня:

$$N_T = 0.5 \cdot 6 + 0.3 \cdot 8 + 0.2 \cdot (8 + 2) = 7.4$$

Таблица 18 – Оценка уровня научно-технического эффекта

Уровень НТУ	Показатель НТУ
Низкий	1 - 4
Средний	4 - 7
Сравнительно высокий	7 - 10
Высокий	10 - 13

Таким образом, данная НИР имеет сравнительно высокий уровень НТУ, равный 7.4.

*Вывод.* Интенсивное развитие техники привело к высоким требованиям к процессам упрочнения стали. Требуется, чтобы процесс был менее энергоемким, по сравнению с традиционными методами азотирования в газе и более экономичным. Исследуемая сталь содержит малую долю дорогостоящих легирующих элементов, что обеспечивает ее низкую себестоимость, в сравнении с высоколегированными системами. Предполагается увеличить прочностные свойства стали за счет насыщения ионами азота, а не за счет длительного азотирования в газовой камере. Такой метод обеспечит снижение себестоимости товара (необходимы минимальные затраты: электроэнергия,

амортизация установки). В ходе разработки данной главы выпускной квалификационной работы были решены следующие задачи:

1. Проведена оценка коммерческого потенциала и эффективности проведения научного исследования на примере SWOT-анализа. В процессе проведенного SWOT - анализа были определены следующие преимущества исследования: а) в связи с наличием всего необходимого для проведения исследования, результаты могут привести к возможности выхода на рынок и внедрения в технологический процесс машиностроительных заводов и предприятий. б) результаты эксперимента будут иметь высокий спрос, если экономическое положение РФ будет более благоприятным.

2. Составлен план научного исследования, в котором разработан календарный план. Общее содержание работ для проведения исследования составило 12 позиций. Для построения таблицы временных показателей проведения НИР был рассчитан коэффициент календарности. С помощью данных показателей был разработан календарный - план график проведения НИР по теме. Для иллюстрации календарного плана была использована диаграмма Ганта, что указывает на целесообразность проведения данного исследования.

Рассчитан бюджет научного исследования. Как видно из проведенного анализа общая стоимость настоящего научного исследования 112047 тыс.руб.

Исходя из полученных результатов вышеприведенного экономического обоснования, ряд задач, поставленных для осуществления цели данного раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» выполнены. В целом, данное научное исследование является перспективным, имеющим коммерческий и научный потенциал, результаты которого будут интересны машиностроительным, судостроительным, авиастроительным и прочим предприятиям, использующим в своем производстве детали из стали, а также актуальны для Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ).

## Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы был проведен обзор литературы по тематике исследования и подготовлен литературный обзор, в котором были подробно рассмотрены методы насыщения азотом металлических материалов, способы ионного азотирования в тлеющем разряде и с эффектом полого катода, особенности азотирования аустенитных коррозионностойких сталей. В оригинальной части работы описаны основные закономерности влияния исходной термомеханической обработки аустенитной нержавеющей стали 01X17H13M3 и режима ионного азотирования (традиционного ионного азотирования и азотирования с эффектом полого катода) на ее механические, пластические свойства, закономерности деформации и разрушения.

На основе анализа данных по влиянию режимов исходной термомеханической обработки и последующего азотирования стабильной аустенитной стали 01X17H13M3 можно сделать следующие выводы:

— Ионное азотирование способствует изменению прочностных характеристик, снижает пластические свойства стали 01X17H13M3, что обусловлено образованием хрупкого поверхностного слоя на образцах. После азотирования образцы деформируются вязко (матрица), а поверхностный азотированный слой разрушается хрупко – сколом. Максимальное охрупчивание при азотировании (ТИА) происходит в образцах с наименьшим размером зерна (субзерна). Формирование зеренно-субзеренной структуры субмикронного масштаба не приводит к большему охрупчиванию по сравнению с мелкозернистыми образцами при ионном азотировании с ЭПК, но способствует формированию более толстого упрочненного поверхностного слоя;

— Независимо от размера зерна стали 01X17H13M3 и режима насыщения азотом, ионное азотирование слабо влияет на стадийность

пластического течения, но приводит к уменьшению величины деформации до разрушения образцов;

— Формирование высокодефектной зеренно-субзеренной структуры с высокой плотностью дислокаций способствует увеличению предела текучести образцов стали при азотировании, в то время как в образцах с равновесной зеренной мелкокристаллической и крупнокристаллической структурой азотирование вызывает разупрочнение;

— Микротвердость азотированного слоя составляет 11–12 ГПа, микротвердость аустенитной матрицы 1.5–2.0 ГПа в зависимости от исходной обработки стали до азотирования. Формирование протяженной зоны внутреннего азотирования обеспечивает плавное изменение микротвердости от поверхности к центру образцов;

— После термомеханических обработок и ионного азотирования в структуре стали 01X17H13M3 основными фазами в поверхностных слоях являются аустенит, пересыщенный азотом аустенит, нитриды различного состава и  $\alpha$ -железо.

— Выбор режима предварительной термомеханической обработки стали 01X17H13M3 перед процессом ионного азотирования дает возможность целенаправленно управлять параметрами упрочненного слоя в стали, например, толщиной слоя или шириной зоны внутреннего азотирования.

### **Благодарности**

Авторы выражают благодарность к.т.н. К.Н. Рамазанову, к.ф.-м.н. Майер Г.Г. и аспиранту Е.В. Мельникову за оказание помощи в проведении исследования.

Работа выполнена с использованием оборудования Томского материаловедческого центра коллективного пользования «Нанотех».

## Список публикаций

### Статьи:

1. Moskvina V. A., Astafurova E. G., Galchenko N. K., Melnikov E. V., Mayer G. G., Bataev V. A., Bataev I. A. The effect of severe plastic deformation by high-pressure torsion on structure and phase composition of high-nitrogen austenitic steel // AIP Conference Proceedings. - 2015 - Vol. 1683, Article number 020153. - p. 1-4.
2. Astafurova E. G., Mayer G. G., Melnikov E. V., Koshovkina V. S., Moskvina V. A., Smirnov A. I., Bataev V. A. The effect of hydrogenation on strain hardening and deformation mechanisms in  $\langle 113 \rangle$  single crystals of Hadfield steel // AIP Conference Proceedings. - 2015 - Vol. 1683, Article number 020014. - p. 1-5.
3. Astafurova E. G., Tukeeva M. S., Moskvina V. A., Galchenko N. K., Bataev I. A., Bataev V. A. The effect of high-pressure torsion on microstructure and strength properties of high-nitrogen austenitic steel // Письма о материалах. - 2014 - Т. 4 - №. 4. - С. 269-272.
4. Москвина В.А., Астафурова Е.Г., Рамазанов К.Н., Будилов В.В., Майер Г.Г., Мельников Е.В. Влияние ионного азотирования на механизм разрушения и механические свойства стали 01Х17Н13М3, подвергнутой различным термомеханическим обработкам. Известия высших учебных заведений. ФИЗИКА. (Принята в печать, будет опубликована в 2016 г.).

### Труды и материалы конференций:

5. Москвина В. А., Астафурова Е. Г., Рамазанов К. Н. Влияние термомеханической обработки на механические свойства и характер разрушения стали Х17Н13М3, подвергнутой ионному азотированию // Физическое материаловедение: сборник конкурсных докладов VII Международной школы с элементами научной школы для молодежи, Тольятти, 31 Января-5 Февраля 2016. - Тольятти: ТГУ, 2016 - С. 115-119.

6. Москвина В. А., Рамазанов К. Н., Мельников Е. В., Майер Г. Г. Влияние размера зерна и структурного состояния стали X17H14M2 на механические и пластические свойства, формируемые при ионном азотировании // Уральская школа молодых металлургов : сборник материалов и докладов XVI Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов – молодых ученых: в 2 т., Екатеринбург, 7-11 Декабря 2015. - Екатеринбург: УрФУ, 2015 - Т. 1 - С. 137-140.
7. Козлова Т. А., Мельников Е. В., Астафурова Е. Г., Москвина В. А. Влияние прокатки комбинированной с обратимым легированием водородом на структуру, фазовый состав и механизмы деформации стали 01X17H13M3 // Материалы и технологии новых поколений в современном материаловедении: сборник трудов международной конференции с элементами научной школы для молодежи, Томск, 9-11 Ноября 2015. - Томск: ТПУ, 2015 - С. 44-47.
8. Кошовкина В. С., Мельников Е. В., Москвина В. А. Влияние отжигов на структуру и микротвердость стали 06МБФ после кручения на наковальнях Бриджмена [Электронный ресурс] // Современные техника и технологии: сборник трудов XXI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 2 т., Томск, 5-9 Октября 2015. - Томск: ТПУ, 2015 - Т. 1 - С. 376-378.
9. Мельников Е. В., Кошовкина В. С., Москвина В. А. Влияние температуры пластической деформации на структуру, фазовый состав и механические свойства стали 01X17H13M3 [Электронный ресурс] // Современные техника и технологии: сборник трудов XXI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 2 т., Томск, 5-9 Октября 2015. - Томск: ТПУ, 2015 - Т. 1 - С. 401-403.
10. Москвина В. А., Астафурова Е. Г., Майер Г. Г., Мельников Е. В., Кошовкина В. С. Закономерности влияния кручения под высоким давлением на структуру и прочностные свойства высокоазотистой аустенитной стали X18AG23F3 // Материалы и технологии новых поколений

в современном материаловедении: сборник трудов международной конференции с элементами научной школы для молодежи, Томск, 9-11 Ноября 2015. - Томск: ТПУ, 2015 - С. 71-75.

11. Москвина В. А., Майер Г. Г., Мельников Е. В. Особенности структуры, фазового состава и прочностных свойств высокоазотистой аустенитной стали после кручения под квазигидростатическим давлением [Электронный ресурс] //Современные техника и технологии: сборник трудов XXI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 2 т., Томск, 5-9 Октября 2015. - Томск: ТПУ, 2015 - Т. 1 - С. 407-409.
12. Москвина В. А., Астафурова Е. Г. Структура и фазовый состав высокоазотистой аустенитной стали, подвергнутой кручению под высоким давлением // Высокие технологии в современной науке и технике: сборник научных трудов IV Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Томск, 21-24 Апреля 2015. - Томск: ТПУ, 2015 - С. 125-130.
13. Москвина В. А., Астафурова Е. Г. , Гальченко Н. К. Влияние интенсивной пластической деформации методом кручения под высоким давлением на структуру и фазовый состав высокоазотистой аустенитной стали X20AG20F2 [Электронный ресурс] // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник трудов XII Международной конференции студентов и молодых ученых, Томск, 21-24 Апреля 2015. - Томск: ТПУ, 2015 - С. 184-186.
14. Кошовкина В. С., Майер Г. Г., Мельников Е. В., Москвина В. А., Астафурова Е. Г. Особенности структуры и термическая стабильность стали 06МБФ после кручения под давлением // Перспективные материалы в строительстве и технике: материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием, Томск, 6-9 Октября 2015. - Томск: ТГАСУ, 2015 - С. 277-280.

15. Мельников Е. В., Козлова Т. А., Майер Г. Г., Кошовкина В. С., Москвина В. А., Астафурова Е. Г. Влияние химико-деформационной обработки на структуру, фазовый состав, механизмы деформации и механические свойства стали 01Х17Н13М3 // Перспективные материалы в строительстве и технике // Перспективные материалы в строительстве и технике : материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием, Томск, 6-9 Октября 2015. - Томск: ТГАСУ, 2015 - С. 111-114.
16. Москвина В. А., Майер Г. Г., Мельников Е. В., Кошовкина В. С., Астафурова Е. Г. Изучение структуры, фазового состава и прочностных свойств высокоазотистой аустенитной стали, подвергнутой кручению под квазигидростатическим давлением // Перспективные материалы в строительстве и технике: материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием, Томск, 6-9 Октября 2015. - Томск: ТГАСУ, 2015 - С. 115-118.
17. Москвина В. А., Астафурова Е. Г., Рамазанов К. Н. Особенности влияния ионного азотирования на механические свойства и механизм разрушения стали 01Х17Н13М3, подвергнутой различным термомеханическим обработкам //Перспективы развития фундаментальных наук (2016), ISBN 978-5-4387-0652-6, 26-29 апреля 2016. – Томск: ТПУ, 2016 - .С. 181-184.

Тезисы докладов конференций:

18. Астафурова Е. Г., Майер Г. Г., Мельников Е. В., Москвина В. А., Захаров Г. Н., Гальченко Н. К. Влияние легирования водородом на закономерности деформационного упрочнения и механизм разрушения высокоазотистой хромомарганцевой стали // XVI Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества: тезисы докладов, Екатеринбург, 12-19 Ноября 2015. - Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2015 - С. 117.
19. Астафурова Е. Г., Майер Г. Г., Мельников Е. В., Москвина В. А., Кошовкина В. С., Захаров Г. Н. Механизмы деформации и деформационное

- упрочнение монокристаллов стали Гадфильда, легированных водородом // XVI Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества: тезисы докладов, Екатеринбург, 12-19 Ноября 2015. - Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2015 - С. 115-116.
20. Tukeeva M. S., Melnikov E. V., Mayer G. G., Moskvina V. A., Astafurova E. G. Influence of high-pressure torsion on structural and phase transitions in high interstitial austenitic steels // 17th International Conference on the Strength of Materials : Book of Abstracts, Brno, August 9-14, 2015. - Brno: IPM, 2015 - p. 249-250.
21. Астафурова Е. Г., Майер Г. Г., Мельников Е. В., Кошовкина В. С., Москвина В. А. Влияние легирования водородом на механизмы деформации и деформационного упрочнения <113>-монокристаллов стали Гадфильда // Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций: сборник тезисов докладов, Томск, 21-25 Сентября 2015. - Томск: ИФПМ СО РАН, 2015 - С. 60-61.
22. Кошовкина В. С., Майер Г. Г., Мельников Е. В., Москвина В. А., Астафурова Е. Г., Найденкин Е. В. Исследование структуры и микротвердости стали 06МБФ в различных исходных состояниях после кручения под давлением и отжигов //Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций: сборник тезисов докладов, Томск, 21-25 Сентября 2015. - Томск: ИФПМ СО РАН, 2015 - С. 137-138.
23. Мельников Е. В., Астафурова Е. Г., Козлова Т. А., Винокуров В. А., Майер Г. Г., Кошовкина В. С., Москвина В. А. Влияние температуры прокатки на структуру и свойства аустенитной стали 01Х17Н13М3 // Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций: сборник тезисов докладов, Томск, 21-25 Сентября 2015. - Томск: ИФПМ СО РАН, 2015 - С. 160-161.
24. Москвина В. А. Влияние кручения под высоким давлением на структуру, фазовый состав и прочностные свойства высокоазотистой аустенитной

стали// Функциональные материалы: разработка, исследование, применение: сборник тезисов докладов III Всероссийского конкурса научных докладов студентов, Томск, 26-27 Мая 2015. - Томск: ТПУ, 2015 - С. 28-29.

25. Москвина В. А. , Астафурова Е. Г. , Майер Г. Г. , Мельников Е. В. , Кошовкина В. С. , Гальченко Н. К. Влияние кручения под давлением на структуру и микротвердость высокоазотистой аустенитной стали X18AG23F3 // Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций: сборник тезисов докладов, Томск, 21-25 Сентября 2015. - Томск: ИФПМ СО РАН, 2015 - С. 164-165.
26. Астафурова Е. Г., Майер Г. Г., Мельников Е. В., Москвина В. А., Захаров Г.Н. Влияние легирования водородом на закономерности деформационного упрочнения и механизм разрушения высокоазотистой хромомарганцевой стали // Тезисы докладов XVI Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества, Екатеринбург, 12-19 Ноября 2015. - Екатеринбург: ИФМ УрО РАН , 2015 - С. 117.