

Школа неразрушающего контроля и безопасности  
 Направление подготовки 15.04.01 Машиностроение  
 Отделение электронной инженерии

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>ОСОБЕННОСТИ ТЫЛЬНОГО УПРОЧНЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ МИШЕНИ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ МЕГАВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА</b>

УДК 621.791.72:669.15-194.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ71	Мирошников Егор Викторович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭИ	Гнюсов С.Ф.	д.т.н., профессор		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Фадеева В.Н.	к.ф.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД	Дашковский А.Г.	к.т.н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭИ	А.С. Киселев	к.т.н.		

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП 15.04.01

Код	Результат обучения
<b>Универсальные компетенции</b>	
P1	Способность применять глубокие естественнонаучные, математические и инженерные знания при создании новых конкурентоспособных технологий изготовления деталей и сборки машин с применением компьютерных технологий
P2	Способность ставить и решать инновационные инженерные задачи с использованием системного анализа и моделирования объектов и процессов машиностроения
P3	Способность разрабатывать методики и организовывать проведение теоретических и экспериментальных исследований в области технологии машиностроения с использованием новейших достижений науки и техники.
P4	Способность проводить маркетинговые исследования, используя знания проектного менеджмента, участвовать в создании или совершенствовании системы менеджмента качества предприятия.
P5	Способность работать в многонациональном коллективе над междисциплинарными проектами в качестве исполнителя и руководителя.
P6	Способность подготавливать научно-технические отчеты, обзоры, методическую документацию, публикации по результатам выполненных исследований в области машиностроения
<b>Профессиональные компетенции</b>	
P9	Применять глубокие знания в области конструирования сборочно-сварочных приспособлений, механизации и автоматизации сварочных процессов с учетом специфики технологии изготовления сварной конструкции
P10	Решать инновационные задачи по сварке специальных сталей, применению современных методов неразрушающего контроля с использованием системного анализа и моделирования процессов контроля
P11	Ставить и решать инновационные задачи по применению необходимого оборудования для контактной сварки, проектировать сварочные процессы с принципиально новыми технологическими свойствами, конкурентоспособных на мировом рынке машиностроительного производства

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

Школа **неразрушающего контроля и безопасности**  
 Направление подготовки **15.04.01 Машиностроение**  
 Отделение **электронной инженерии**

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП

\_\_\_\_\_ А.С. Киселев  
 (Подпись)    (Дата)    (Ф.И.О.)

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

В форме:

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

Студенту:

Группа	ФИО
1BM71	Мирошникову Егору Викторовичу

Тема работы:

Особенности тыльного упрочнения и разрушения мишени из аустенитной стали под воздействием мегавольтного электронного луча.	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 3645/С от 13.05.2019

Срок сдачи студентом выполненной работы:	06.06.2019
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b>  <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектом исследования являются образцы стали 304L после ударно-волнового нагружения сильноточным наносекундным релятивистским электронным пучком.</p>
---	--

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b> <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Обзор литературы.</li> <li>2. Постановка задачи исследования.</li> <li>3. Материалы и методы исследования.</li> <li>4. Результаты и обсуждение.</li> <li>5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.</li> <li>6. Социальная ответственность.</li> <li>7. Заключение и выводы.</li> </ol>
<p><b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Титульный лист (название работы), цель, задачи.</li> <li>3. Материалы и методы исследования.</li> <li>4. Профиль микротвердости по глубине в ударно нагруженном образце стали 304L и изменение амплитуды ударной волны в разные периоды времени.</li> <li>5. Профили микротвердости по толщине мишени от числа импульсов нагружения.</li> <li>6. Микроструктура мишеней из стали 304L после динамического нагружения.</li> <li>7. Распределение количества двойников деформации в зернах.</li> <li>8. Среднее количество двойников деформации в зерне по зонам от числа импульсов нагружения.</li> <li>9. Экономическая часть, социальная ответственность.</li> <li>10. Заключение и выводы.</li> </ol>

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

*(с указанием разделов)*

Раздел	Консультант
Основная часть магистерской диссертации	Гнюсов Сергей Федорович
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Фадеева Вера Николаевна
Социальная ответственность	Дашковский Анатолий Григорьевич
Часть магистерской диссертации на английском языке	Смирнова Ульяна Александровна

**Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:**

1.1 Сталь Гадфильда
1.2 Аустенитные стали и механизмы их упрочнения
1.3 Аустенитная нержавеющая сталь 12X18H10T

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	30.01.2019
--	------------

**Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭИ	Гнюсов С.Ф.	д.т.н., профессор		30.01.2019

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ71	Мирошников Егор Викторович		30.01.2019

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

Школа **неразрушающего контроля и безопасности**  
 Направление подготовки **15.04.01 Машиностроение**  
 Уровень образования **магистратура**  
 Отделение **электронной инженерии**  
 Период выполнения (осенний / весенний семестр 2018 /2019 учебного года) \_\_\_\_\_

Форма представления работы:

<b>Магистерская диссертация</b>
---------------------------------

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

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

Срок сдачи студентом выполненной работы:	06.06.2019
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
04.02.2019	1 Литературный обзор	25
25.02.2019	2 Материалы, оборудование и методы исследования	5
29.03.2019	3 Экспериментальная часть	35
15.04.2019	4 Выводы	10
22.04.2019	5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
06.05.2019	6 Социальная ответственность	10
13.05.2019	7 Часть магистерской диссертации на английском языке	5

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭИ	Гнусов С.Ф.	д.т.н., профессор		30.01.2019

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭИ	А.С. Киселев	к.т.н.		30.01.2019

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1ВМ71	Мирошникову Егору Викторовичу

<b>Школа</b>	<b>ИШНКБ</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>ЭОИ</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	15.04.01 Машиностроение

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ)</i>	<i>Стоимость применяемого оборудования для проведения эксперимента, заработная плата с учетом районного коэффициента, стоимость электроэнергии</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	...
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Отчисления от заработной платы по единому социальному налогу 30%</i>

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

1. <i>Оценка коммерческого потенциала инженерных решений (ИР)</i>	<i>Экономическая целесообразность применения научного исследования</i>
2. <i>Формирование плана и графика разработки и внедрения ИР</i>	<i>Планирование комплекса работ по выбранной теме</i>
3. <i>Обоснование необходимых инвестиций для разработки и внедрения ИР</i>	...
4. <i>Составление бюджета инженерного проекта (ИП)</i>	<i>Привести затраты на приобретение оборудования и материалов</i>
5. <i>Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности ИР и потенциальных рисков</i>	<i>Рассчитать трудозатраты, энергозатраты, затраты на материалы, амортизацию оборудования</i>

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

1. FAST - анализ
2. Матрица SWOT
3. Оценка готовности проекта к коммерциализации
4. Инициация проекта
5. Планирование управления проектом
6. График разработки и внедрения ИР
7. Инвестиционный план. Бюджет ИП
8. Основные показатели эффективности ИП

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	01.03.2019
---	------------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОСГН	Фадеева В.Н.	к.ф.н.		01.03.2019

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
1ВМ71	Мирошников Егор Викторович		01.03.2019

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
<u>1ВМ71</u>	Мирошникову Егору Викторовичу

<b>Школа</b>	<b>ИШНКБ</b>	<b>Отделение(НОЦ)</b>	<b>ЭОИ</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	15.04.01 Машиностроение

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<i>1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса):</i>	<i>Помещение с естественной вентиляцией воздуха расположено на 3 этаже 3 этажного производственного корпуса. В помещении размещено оборудование: ПЭВМ; площадь помещения составляет: 40 м<sup>2</sup>, размещено 6 РМ.</i>
<i>2. Отбор законодательных и нормативных документов по теме.</i>	<i>ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-9</i>

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

<i>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i>	<i>Анализ выявленных вредных факторов: - Электромагнитные поля в производственных помещениях; - Производственный шум; - Общая система производственного освещения; - Микроклимат в помещении;</i>
<i>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</i>	<i>Анализ выявленных опасных факторов: - Поражение электрическим током;</i>
<i>3. Охрана окружающей среды.:</i>	<i>Хранение и утилизация люминесцентных ламп</i>
<i>4. Защита в чрезвычайных ситуациях:</i>	<i>Вероятной ЧС является пожар; эвакуация, средства тушения</i>
<i>5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности и социальной защиты работников на предприятии</i>	<i>Пособие по временной нетрудоспособности</i>

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

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ООД	Дашковский А.Г.	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
1ВМ71	Мирошников Егор Викторович		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа – 132 с., 13 рисунков, 21 таблица, 53 использованных источника, 11 листов демонстрационного материала (слайдов), 1 приложение.

Ключевые слова: сильноточные электронные пучки, аустенитная сталь, деформационное упрочнение, двойникование, микроструктура, микротвердость.

Объектом исследования являются образцы стали 304L.

Цель работы - исследование эволюции объемного упрочнения мишеней из стали 304L под влиянием многократного мегавольтного электронного луча.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- сделан анализ литературы по исследуемому вопросу и осуществлена постановка задачи исследования;
- подготовлены образцы и проведены эксперименты по ударно-волновому нагружению мишеней МЭП с количеством импульсов от 1 – 6;
- построены графики распределения микротвердости вдоль оси пучка электронов с различным количеством импульсов воздействия;
- изучена эволюция структуры стали 304L в зависимости от количества импульсов нагружения по толщине мишеней;
- проведен анализ полученных результатов и даны рекомендации по дальнейшему исследованию.

## **Abstract**

Graduate qualification work consists of 132 pages, 13 figures, 21 tables, 53 sources, 11 sheets of demonstration material (slides).

Keywords: high-current electron beam, cold-work strengthening, twin formation, microstructure, microhardness.

The object of the research is the samples of 304L steel.

The aim of the research is to study the features of the rear hardening of a target of 304L steel when exposed to a megavoltage electron beam.

To achieve this goal, the following tasks were accomplished:

- the analysis of domestic and foreign literature on the researched question was made and problem definition of a research was performed;
- samples were prepared and experiments were carried out on shock-wave loading of MEB targets with the number of pulses from 1 – 6;
- graphs of the microhardness distribution along the axis of the electron beam with different numbers of impact pulses were plotted;
- the evolution of the 304L steel structure was studied depending on the number of loading pulses over the target thickness;
- the analysis of the obtained results and recommendations for further research.

## Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

В настоящей работе применены следующие термины с соответствующими определениями.

Аустенит – твёрдый раствор углерода в гранцентрированной кубической решётке железа.

Феррит – твёрдый раствор углерода объёмно центрированной кубической решётке железа.

Мартенсит – мелкодисперсная структура пластинчатого строения, получающаяся путём кооперативного перемещения атомов на расстояние меньше межатомного.

Двойникование – образование в кристалле областей с разной ориентацией кристаллической решетки, связанных зеркальным отражением в определённой кристаллографической плоскости.

Перлит – эвтектоидная смесь двух равновесных при комнатной температуре фаз: феррита и цементита.

В настоящей работе применены следующие обозначения и сокращения:

- ГЦК – гранцентрированная кубическая решётка;
- КПЭ – концентрированные потоки энергии;
- ИПД – интенсивная пластическая деформация;
- РКУП – равноканальное угловое пресование;
- КВД – кручение высоким давлением;
- МАС – метастабильные аустенитные стали;
- ЗТВ – зона теплового влияния;
- СЭП – сильноточный электронный пучок.

## **Нормативные ссылки.**

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

- ГОСТ Р 1.5-2012 Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные. Правила построения, изложения, оформления и обозначения;
- ГОСТ 7.32-2001 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления;
- СТП ТПУ 2.5.01-2014 Система образовательных стандартов. Работы выпускные квалификационные, проекты и работы курсовые. Структура и правила оформления;
- ГОСТ 12.1.003-83 – Шум. Общие требования безопасности;
- СНиП 23-03-2003 – Защита от шума;
- ОСП-72/87 – Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений;
- НРБ-99/2009 – Нормы радиационной безопасности;
- СН 245-71 – Санитарные нормы проектирования промышленных зданий;
- СанПиН 2.2.4.3359-16 Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах.

## Содержание

Введение .....	14
1 Особенности упрочнения высокомарганцовистых и аустенитных сталей .....	15
1.1 Сталь Гадфильда.....	15
1.2 Аустенитные стали и механизмы их упрочнения.....	20
1.3 Аустенитная нержавеющая сталь 12X18Н10Т .....	21
1.3 Микродеформационные механизмы, действующие в высокомарганцевых аустенитных сталях под воздействием нагрузки .....	28
1.4 Влияние дробеструйной обработки на метастабильные аустенитные нержавеющие стали .....	31
1.5 Влияние лазерного оплавления стали 316L на микроструктуру и свойства .....	34
1.6 Зависимость скорости наноиндентирования аустенитных зерен в метастабильных нержавеющих сталях .....	36
1.7 Особенности развития деформации и разрушения аустенитных сталей при динамическом нагружении .....	39
1.8 Концентрированные потоки энергии .....	48
1.9 Постановка задачи .....	49
2 Материал, оборудование и методы исследования.....	52
3 Экспериментальная часть .....	55
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	63
4.1 Предпроектный анализ.....	63
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования .....	63
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения .....	64
4.1.3 FAST – анализ.....	65
4.1.4 SWOT – анализ .....	68
4.1.5 Оценка готовности проекта к коммерциализации .....	71

4.2 Инициация проекта .....	73
4.3 Планирование управления проектом .....	76
4.3.1 Структура работ в рамках научного исследования .....	76
4.3.3 Разработка графика проведения научного исследования.....	79
4.3.4 Бюджет научного исследования. Затраты на материалы и эксперименты .....	83
4.3.5 Расчет фонда заработной платы .....	83
4.4 Определение ресурсной финансовой и бюджетной эффективности исследования .....	87
4.4.1 Оценка сравнительной эффективности проекта .....	87
5 Социальная ответственность .....	91
5.1 Производственная безопасность.....	91
5.1.1. Анализ выявленных вредных факторов .....	91
5.1.1.1 Электромагнитные поля в производственных помещениях .....	92
5.1.1.2 Производственный шум .....	93
5.1.1.3 Исследование освещенности рабочей зоны .....	94
5.1.1.4 Воздушная среда и микроклимат в помещении.....	98
5.1.2 Анализ выявленных опасных факторов .....	101
5.1.2.1 Требования электробезопасности .....	101
5.2 Экологическая безопасность.....	104
5.3 Защита в чрезвычайных ситуациях .....	105
5.3.1 Пожарная безопасность.....	105
5.3.2 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	109
5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности и социальной защиты работников на предприятии.....	109
5.4.1 Пособие по временной нетрудоспособности .....	109
Список используемой литературы .....	114
ПриложениеА .....	120

## Введение

Развитие техники и оборудования требует изучения материалов, работающих как при статических знакопеременных, так и при динамических нагрузках в широком интервале температур. Это особенно касается развития и эксплуатации ракетной и авиакосмической техники, высокоскоростных воздействий, а также интенсивного ударно-абразивного изнашивания. В данных условиях эксплуатации хорошо себя зарекомендовали аустенитные хромоникелевые стали (стали 12Х18Н10Т, 304, 304L) и высокомарганцовистые износостойкие (типа сталь 110Г13). Однако механизмы их деформации и разрушения в условиях динамического нагружения до конца не выяснены при условии, что в их структуре могут присутствовать дополнительные фазы ( $\alpha$ -фаза ( $\delta$ -феррит) в стали 304L и карбиды типа  $M_3C$  в стали 110Г13). В процессе прокатки стали 304L  $\alpha$  ( $\delta$ )-фаза может раскатываться в виде строчек, а карбид  $M_3C$  в стали 110Г13 выделяться в виде сетки по границам зерен. Более того, особо актуальным остается вопрос воздействия на эти материалы мегавольтных электронных пучков, которые формируют не только лунку абляции на лицевой части мишени, но приводят к формированию и распространению ударной волны большой амплитуды (20 – 30 ГПа) в объем металла. Это приводит как к объемному упрочнению, так и к тыльному отколу мишени. Механизм данного упрочнения до конца не выяснен. Это особенно актуально при многократном динамическом нагружении.

Целью данной работы является исследование эволюции объемного упрочнения мишеней из стали 304L под влиянием многократного мегавольтного электронного луча.

# **1 Особенности упрочнения высокомарганцовистых и аустенитных сталей**

## **1.1 Сталь Гадфильда**

Сталь Гадфильда названа в честь английского металлурга Роберта Гадфильда и им изобретена в 1882 году. Роберт Гадфильд установил, что данная сталь совершенно не похожа на другие стали: после закалки откованный образец стал не тверже, как все стали после закалки, а мягче. Но это была не единственная неожиданность – новая сталь не поддавалась, ни токарной, ни фрезерной обработке. После холоднойковки участки, на которые приходились удары молота, становились твердыми, и чем больше была степень деформации, тем тверже становилась сталь. Благодаря высокой твердости и износостойкости, а также способности выдерживать и поглощать сильные удары без разрушения сталь Гадфильда быстро завоевала признание в промышленности [1].

Сталь Гадфильда, играет большую роль в машиностроении, как конструкционный материал. Изделия из такой стали в условиях эксплуатации, не теряя упруго-вязкостных свойств в основной своей массе, приобретают высокую прочность, твердость и износостойкость поверхностных слоев, подвергаемых внешнему воздействию. Из стали Гадфильда изготавливают: крестовины железных дорог, оконные решётки в тюрьмах, гусеничные траки, детали дробилок [2].

Сталь Гадфильда или сталь 110Г13Л по [3] содержит 0,9 – 1,5 % С; 11,5 – 15 % Мn; 0,3 – 1,0 Si;  $\leq 0,05$  % S;  $\leq 0,12$  % P;  $\leq 1$  % Cr;  $\leq 1$  % Ni;  $\leq 0,3$  % Cu. И соотношение марганца к углероду соответствует не менее 10.

Сталь с содержанием 12 – 14 % Мn является стандартной маркой для карьерного оборудования. При переработке особо абразивных материалов наклепанный слой, обычно имеющий глубину около 3 мм, может быть изношен или снят за счет абразивного износа при ударе, что ведет к быстрому износу более мягкого не наклепанного основного металла.

Эта марка стали обладает начальной твердостью около 200 НВ. В процессе эксплуатации твердость возрастает примерно до 450 НВ [2].

Марганец является элементом аустенизатором, который в сплавах с железом сильно расширяется  $\gamma$  – твердого раствора. У марганца в отличие от большинства металлов, проявляется межатомная связь не газом свободных электронов, а ковалентная связь, причем она сохраняется и в смешанных железомарганцевых кристаллах. Ковалентная связь осуществляется парами эквивалентных электронов с антипараллельными спинами, принадлежащими одновременно двум соседним атомам. Развитие ковалентной связи способствует уменьшению компактности кристаллической решетки и сильно влияет на механические свойства кристалла [4].

Марганец относится к переходным металлам с незаполненной d-оболочкой. Из всех элементов периодической системы элементов переходные металлы обладают наибольшими энергиями связи. Все модификации марганца обладают аномальными для чистого металла свойствами, чрезвычайно высоким коэффициентом термического расширения и высоким удельным электросопротивлением.

При совместном присутствии в стали марганца и углерода эффект расширения  $\gamma$ -области усиливается. Углерод оказывает существенное влияние на физико-механические свойства высокомарганцевистой стали. Оптимальной является концентрация углерода 1,0 – 1,2 %. Превышение указанных пределов концентрации углерода приводит к резкому снижению ударной вязкости стали и к менее интенсивному росту износостойкости. Это связано с ростом зерна и, следовательно, увеличением склонности стали к трещинообразованию после литья и термической обработки [5]. Снижение концентрации углерода ухудшает прочностные характеристики, и износостойкость стали, а при содержании углерода 0,8 % и ниже в структуре стали может появиться мартенситная составляющая, и ее свойства резко ухудшаются. Граница

стабильности марганцовистой стали при содержании 13 – 14 % Mn составляет 0,8 – 0,9 % C [2].

Широкое колебание содержания марганца (10 – 15 %) в стали незначительно влияет на её свойства, а чрезмерное повышение содержания марганца в стали (выше 12 – 13 %) ведет к росту зерна. При уменьшении содержания марганца в стали до 9 – 11 % стойкость стали снижается.

При содержании 1,0 – 1,3 % углерода и 11 – 14 % марганца в высокомарганцовистой стали, аустенит становится очень стабильным, однако критическая скорость выделения карбидов настолько велика, что для получения чисто аустенитной структуры стали требуются высокие скорости ее охлаждения; при этом отливки должны иметь более или менее равномерное сечение. Сталь, имеющая чисто аустенитную структуру без карбидов, вязка и трудно деформируема в холодном состоянии. Присутствие же карбидов значительно ухудшает ее механические свойства. К этой группе относится классическая сталь Гадфильда [6].

На рисунке 1 изображена диаграмма состояния Fe–C–Mn при разных содержаниях углерода и марганца [7].

Микроструктура стали Гадфильда – аустенит с карбидной фазой переменного состава, которая сосредоточена в основном по границам зерен. Карбидам сопутствуют выделения феррита, которые образовались из-за обеднения твердого раствора углеродом. Ее можно ковать и прокатывать при высокой температуре, а также подвергать закалке для фиксации аустенитной структуры. Сталь Гадфильда способна к чрезвычайно интенсивному упрочнению при наклепе [7].

На предел текучести марганцовистой стали наиболее эффективно влияют сильные карбидообразователи. Карбидообразователи – Cr, W, Mo, улучшают прочностные характеристики стали, снижают ее пластичность. Сталь с такими добавками имеет грубое дендритное строение с карбидной сеткой по границам зерен и требует достаточно сложной термической обработки с повышенными температурами закалки (до 1100 – 1150 °C) [5].

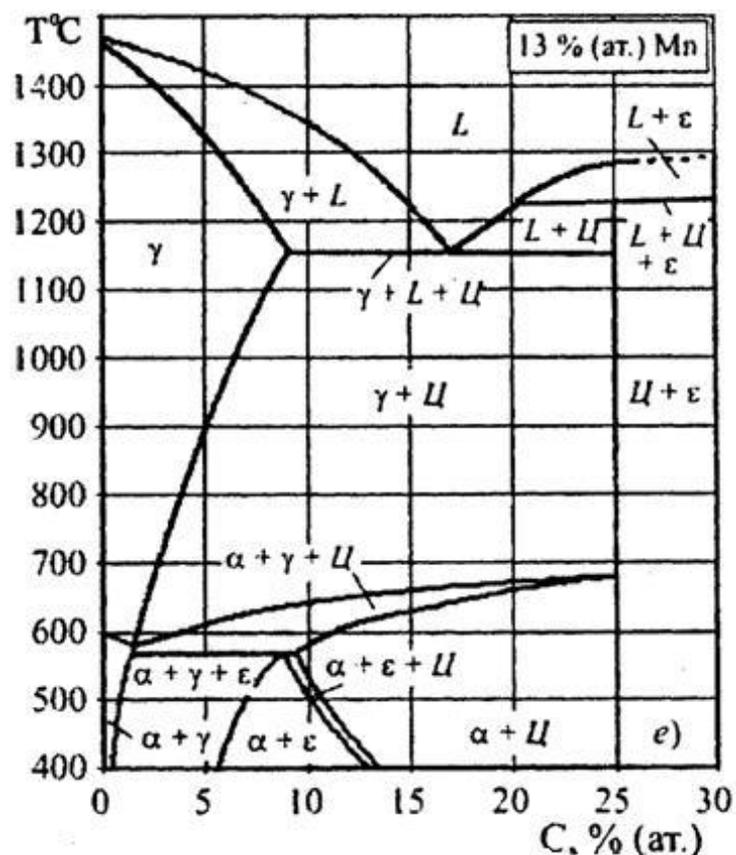


Рисунок 1 – Политермический разрез диаграммы состояния сплава Fe-C-Mn с 13% марганца [7]

Но в большинстве случаев основным дополнительным легирующим элементом является хром. Хром является недорогостоящим элементом и количественное содержание его в стали Гадфильда около 1 %, что улучшает обрабатываемость стали, прочность и износостойкость.

Благотворное влияние на механические свойства высокомарганцовистой стали оказывает мелкое зерно, что достигается деформацией. С увеличением времени холодной деформации сталь упрочняется сильнее – происходит наклеп и уплотнение кристаллической решётки. Твердость достигает 500 – 650 НВ. При деформации, близкой к точке разрушения металла, сталь может приобрести твердость, равную 800 – 850 НВ [1].

Физико-механические свойства литой стали Гадфильда указаны в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Механические свойства [2]

Временное сопротивление $\sigma_b$ , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Относительное сужение $\psi$ , %	Относительное удлинение пластичность $\delta$ , %	Твёрдость по Бринеллю НВ
800 – 900	310 – 350	30 – 50	15 – 20	200

Таблица 2 – Физические свойства [2]

Модуль упругости E, МПа	Модуль сдвига G, МПа	Плотность $\rho$ , кг/куб. м
200000	78000	7820

Сталь Гадфильда может выдерживать сжимающую нагрузку до 550 МПа, с пластической деформацией 50 – 55 % [5].

Жидкотекучесть данной стали хорошая и улучшается с увеличением содержания углерода. Также жидкотекучесть улучшают марганец, кремний и фосфор. Усадка высокомарганцевистой стали при литье гораздо выше, чем у углеродистых сталей. Большое значение линейной усадке приводит к появлению горячих трещин и усадочных раковин в отливках [6].

Склонность стали Гадфильда к образованию горячих трещин обусловлена не только большой линейной усадкой, также причиной являются: пониженная теплопроводность, высокое сопротивление формы усадке, повышенная чувствительность металла к перегреву при заливке и концентрация напряжений в частях отливок, низкая пластичность и прочность стали при высокой температуре [2].

Ударная вязкость – является одной из важнейших характеристик надежности отливок из высокомарганцевой стали. Несмотря на большое число работ, посвященных стали, нет еще единой теории само упрочнения ее при ударном нагружении. По мнению ряда авторов, большую роль в упрочнении стали Гадфильда играет измельчение блоков и микронапряжения. Высокая вязкость аустенита наряду с достаточной прочностью и износоустойчивостью делает сталь Гадфильда незаменимым

материалом для деталей, работающих на износ и удар одновременно. Отливки из стали редко подвергаются дополнительной обработке, так как она плохо обрабатывается резанием из-за наклепа поверхности в процессе резания [5]. Ударная вязкость чувствительна как к изменению химического состава стали, так и параметров ее плавки, разливки, кристаллизации и термической обработки. Однако имеются данные, свидетельствующие о том, что ударная вязкость стали не зависит от ее химического состава и практически полностью определяется степенью загрязнения металла оксидными неметаллическими включениями при отсутствии остаточных железомарганцевых карбидов [2].

В условиях истирания со значительными ударными или большими удельными статистическими нагрузками, сталь Гадфильда обладает высокой износостойкостью, однако эта сталь быстро выходит из строя при интенсивном абразивном износе (когда ударная или удельная статическая нагрузка невелика и непостоянна). В этих условиях износостойкость высокомарганцевой стали низкая. Это происходит потому, что поверхность отливок из высокомарганцевой стали при эксплуатации не успевает получить достаточное упрочнение (не наклепывается) [5]. Поэтому отливки из марганцевой стали следует закалять [6].

## **1.2 Аустенитные стали и механизмы их упрочнения**

Аустенитная сталь представляет собой высоколегированный железный сплав, легированный элементами, расширяющими  $\gamma$  – область: углерод, никель, марганец, кобальт; а также расширяющими область  $\alpha$ -железа: хром, алюминий, вольфрам, молибден, ниобий, кремний, титан. Такие стали имеют преимущественно структуру с гранцентрированной кубической (ГЦК) решёткой от точки кристаллизации до криогенных температур. Присутствует и фаза с объемно-центрированной кубической (ОЦК) решёткой, представленная высоколегированным  $\delta$ -ферритом в количестве 0 – 10 об.%. Стали аустенитного класса делятся на следующие

основы: никелевая, хромоникелевая, марганцевая, хромомарганценикелевая, хромомарганцевая, хромоникелемолибденовая и высококремнистая. Наибольшее применение получили сплавы на никелевой, хромоникелевой и марганцевой основах.

Аустенитные стали в основном применяют в качестве коррозионно-стойких, жаропрочных, жаростойких, криогенных конструкционных материалов в химических, теплоэнергетических и атомных установках, где они подвергаются совместному действию напряжений, высоких температур и агрессивных сред.

Прочность аустенитных сталей зависит от свойств аустенита и факторов, определяющими тонкую структуру (субструктуру) стали. Легирующие элементы, дополнительно вводимые для стабилизации аустенита и упрочнения стали, могут образовывать новые фазы при взаимодействии друг с другом, изменяя количество и состав выделяющихся фаз [8].

Аустенитные стали хорошо подвергаются упрочнению различными механизмами: твёрдорастворный, деформационный, дисперсионный и упрочнение за счёт магнитного упорядочения.

### **1.3 Аустенитная нержавеющая сталь 12X18Н10Т**

Сталь 12X18Н10Т – хромоникелевая нержавеющая сталь аустенитного класса. Благодаря своим уникальным качественным характеристикам сталь данной марки может использоваться в различных сферах производства и промышленности. Материал получил широкое применение в пищевой, нефтяной, топливно-энергетической, химической промышленности, машиностроении и в авиаконструкциях и космической индустрии. В химической промышленности марку стали 12X18Н10Т используют для изготовления емкостей, предназначенных для работы под высоким давлением, а также в устройствах для выработки жидкого

кислорода. Коррозионноустойчивая сталь применяется для производства сварной аппаратуры и конструкций, эксплуатация которых подразумевает контакт с окислительными средами, органическими растворителями, неорганическими кислотами умеренной концентрации. Из этого материала производят трубы, транспортирующие растворы агрессивных жидкостей, таких как фосфорная, азотная, уксусная кислота, а также их оснований и солей. Сталь широко используется в криогенной технике (при температуре до минус 269 °С), а также для реакционного, теплообменного и емкостного оборудования, в том числе для трубопроводов высокого давления и паронагревателей с предусмотренной эксплуатационной температурой до плюс 600 °С. Из стали данной марки изготавливают детали для коллекторов выхлопных систем, печной аппаратуры и муфелей. Кроме того, она используется для производства нержавеющей листа, кругов, проволоки (в том числе и для сварочных работ), труб. Из стальных нитей изготавливают сетки, пружины, тросы и канаты [9].

Сталь 12Х18Н10Т по [10] содержит до С – 12 %, Si до 0,8 %, Mn до 2 %, Ni 9 – 11 %, S до 0,02 %, P до 0,035 %, Cr 17 – 19 %, Cu до 0,3 %, Ti 0,4 – 1 %, Fe ~ 67 %.

Введение достаточного количества никеля в 18 %-ную хромистую сталь делает ее аустенитной, что обеспечивает лучшие механические свойства, меньшую склонность к росту зерна, а также более коррозионноустойчивой и не хладноломкой. Нержавеющие стали с 18 % Cr и 10 % Ni получили наиболее широкое распространение в машиностроении, в изделиях широкого потребления, а также в архитектуре и скульптуре. Представление об условиях образования фаз в нержавеющей хромоникелевых сплавах дает система Fe–Cr–Ni. На рисунке 2 приведен горизонтальный разрез при 650 °С системы Fe–Cr–Ni (сплошные линии). Однофазные  $\gamma$ - и  $\alpha$ -области разделены двухфазной  $\gamma + \alpha$ . При содержании хрома более 20 % появляется  $\alpha$ -фаза (химическое соединение FeCr). Положение двухфазной области  $\gamma + \alpha$  зависит от температуры. С понижением температуры ниже

650 °С область  $\gamma + \alpha$  уходит вправо и ее крайнее положение при 20 °С показано пунктирными линиями, закончившимися в точках *c* и *g*, а при повышении температуры область уходит влево и ее крайнее положение при 1100 °С показывает пунктирные линии, заканчивающиеся в точках *a*, *d*.

Отсюда следует, что сплавы, лежащие ниже линии *abc*, имеют полную  $\gamma \leftrightarrow \alpha$  – перекристаллизацию со структурой феррита при комнатной температуре. Между линиями *abc* и *defg* заключены полуферритные (или полуаустенитные) сплавы с частичным  $\gamma \leftrightarrow \alpha$  – превращением. Сплавы левее линии *be* – ферритные, а правее *fg* – аустенитные.

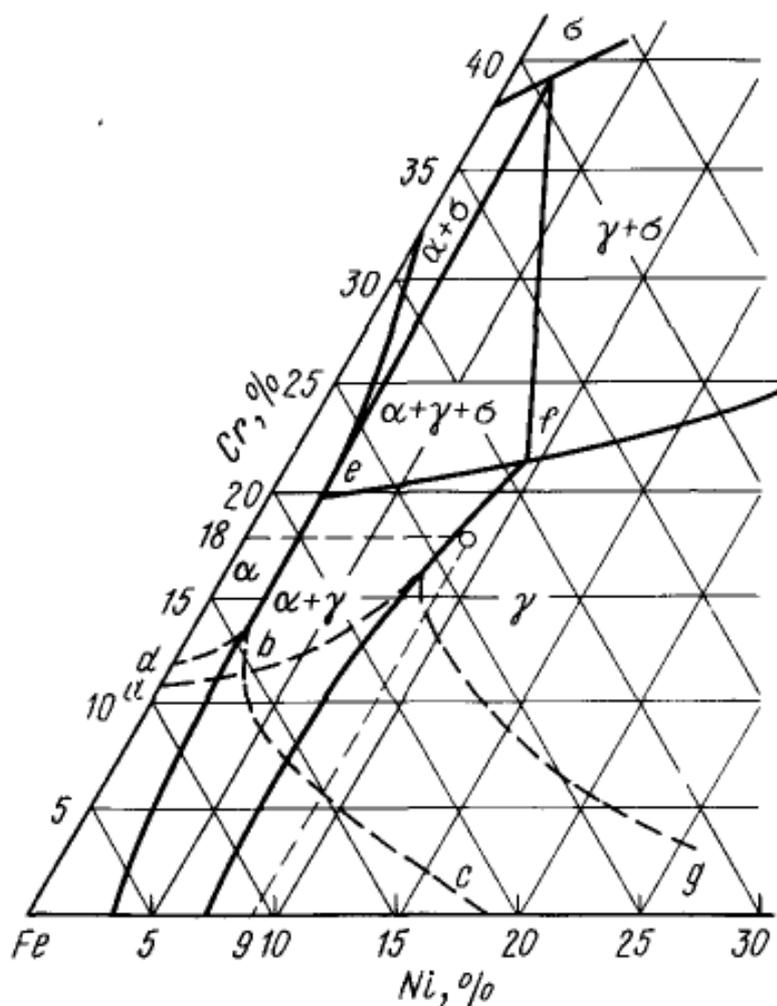


Рисунок 2 – Железный угол системы Fe-Cr-Ni. Сплошные линии – изотермический разрез при 650 °С [9]

Структурное состояние сплавов 18 % Cr и 8 – 15 % Ni в зависимости от колебания состава может быть устойчивым и неустойчивым. Пластическое деформирование при низкой температуре может вызвать в некоторых случаях образование так называемого гексагонального  $\epsilon$ -мартенсита (промежуточное состояние), который затем может перейти в обычный  $\alpha$ -мартенсит.

Аустенитные стали с 18 % Cr и 8 – 10 % Ni структурно неустойчивы, охлаждение его в области отрицательных температур или пластическая деформация при комнатной температуре вызовут образование мартенсита. В сплаве с 18 % Cr и 8 – 12 % Ni образование мартенсита можно вызвать лишь деформацией при температурах ниже 0 °C, сплавы же с 18 % Cr и более 14 % Ni обладают стабильным аустенитом; ни охлаждение, ни деформация при низких температурах не вызовут образования  $\alpha$ -фазы. Российским аналогом стали 08X18H10T является американская сталь типа SS304L.

Промышленные хромоникелевые стали, естественно, не являются чистыми Fe–Cr–Ni-сплавами, а содержат примеси. Эти примеси, растворяясь в основных фазах ( $\gamma$  и  $\alpha$ ) влияют на условия и равновесия и на кинетику  $\gamma \leftrightarrow \alpha$  – превращения. Если же примеси образуют новые фазы, например карбиды, нитриды, интерметаллиды и др., то они могут существенно изменить свойства стали, хотя их влияние на  $\gamma \leftrightarrow \alpha$  – превращение в этом случае менее значительно.

Элементы, растворенные в  $\gamma$ - и  $\alpha$ -фазах, можно разделить на две категории: способствующие  $\gamma \leftrightarrow \alpha$  – превращению (ферритообразующие) и препятствующие этому превращению (аустенитообразующие).

К аустенитообразующим элементам, т.е. действующим аналогично никелю, относится углерод, азот и марганец. К ферритообразующим, влияющим, подобно увеличению хрома, – молибден, вольфрам, титан, ниобий, тантал и кремний. Решить к какой группе по структуре отнести промышленные сложные по составу хромоникелевые стали, содержащие

углерод, азот, марганец, кремний, титан и другие элементы, довольно трудно; тройная система Fe-Cr-Ni (рисунок 3) уже не дает на это ответа [9].

Для этих целей можно воспользоваться схематической диаграммой, показывающей структурное состояние сплава при комнатной температуре в зависимости от содержания ферритообразующих и аустенитообразующих элементов (рисунок 3). Влияние каждого элемента приведено к влиянию хрома и никеля соответствующим коэффициентом. Так, углерод как аустенитообразующий элемент влияет в 30 раз сильнее никеля, а ниобий – два раза слабее хрома.

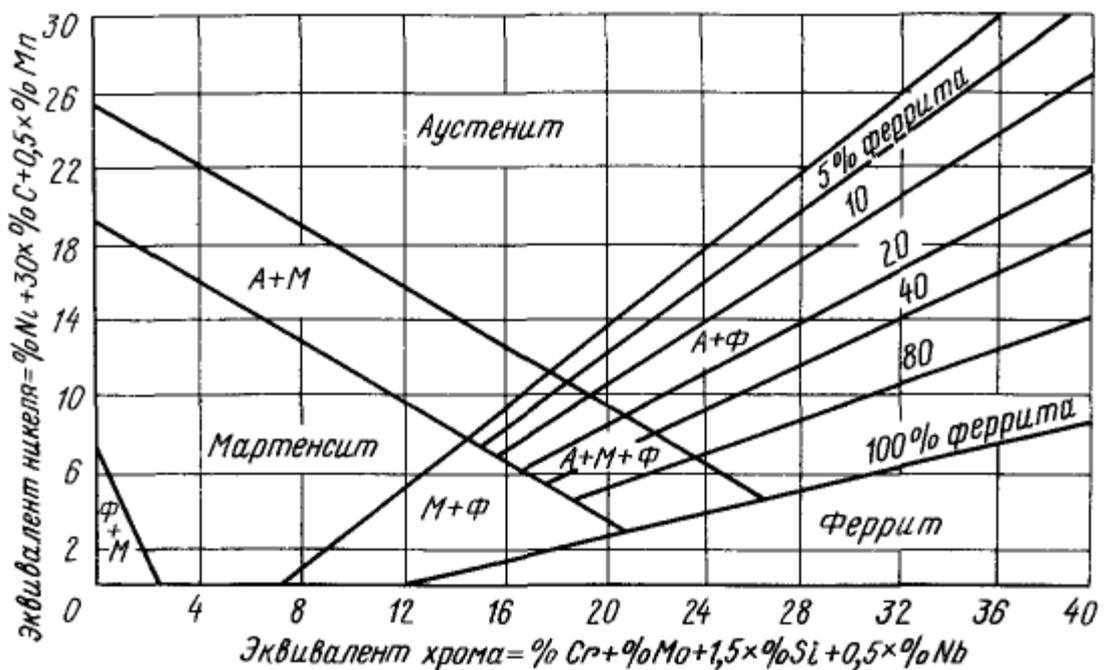


Рисунок 3 – Структурная диаграмма нержавеющей стали [9]

К этому же классу относятся и те стали, аустенит которых при охлаждении до комнатной температуры хотя и не дает признаков  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения, но все же неустойчив, так как при обработке холодом или под действием пластической деформации он превращается в мартенсит.

Аустенитные нержавеющие стали применяют очень широко не только из-за высоких антикоррозионных свойств, но и благодаря высоким технологическим и механическим свойствам. Эти стали хорошо прокатываются в горячем и холодном состояниях, в холодном состоянии

выдерживают глубокую вытяжку и профилирование, допускают применение электросварки, без охрупчивания околошовных зон.

Термическая обработка нержавеющей сталей аустенитного класса сравнительно проста и заключается в закалке в воде с 1050 – 1100 °С. Нагрев до этих температур вызывает растворение карбидов хрома, а быстрое охлаждение фиксирует состояние перенасыщенного твердого раствора. Медленное охлаждение недопустимо, так как при этом, как и при отпуске, возможно выделение карбидов, приводящее к ухудшению пластичности и коррозионной стойкости. Кроме того, при закалке происходят рекристаллизационные процессы, устраняющие последствия пластической деформации, которой часто подвергаются нержавеющей аустенитные стали. В результате закалки твердость этих сталей не повышается, а снижается, поэтому для аустенитных нержавеющей сталей закалка является смягчающей термической операцией.

Механические свойства аустенитных нержавеющей сталей в закаленном (смягченном) состоянии характеризуется низким значением предела текучести, невысокой прочностью и очень высокой пластичностью.

Таблица 3 – Механические свойства [9]

Временное сопротивление $\sigma_b$ , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Относительное сужение $\psi$ , %	Относительное удлинение пластичность $\delta$ , %	Твёрдость по Бринеллю НВ
490	195	55	40	

Таблица 4 – Физические свойства [9]

Физические свойства стали 12Х18Н10Т						
T (Град)	E $10^{-5}$ (МПа)	$\alpha$ $10^6$ (1/Град)	$\lambda$ (Вт/(м·град))	P (кг/м <sup>3</sup> )	C (Дж/(кг·град))	R $10^9$ (Ом·м)
20	1.98		15	7920		725

Продолжение таблицы 4

100	1.94	16.6	16		462	792
200	1.89	17	18		496	861
300	1.81	17.2	19		517	920
400	1.74	17.5	21		538	976
500	1.66	17.9	23		550	1028
600	1.57	18.2	25		563	1075
700	1.47	18.6	27		575	1115
800		18.9	26		596	
900		19.3				

Радикальный способ упрочнения аустенитных сталей – холодный наклеп; при деформации порядка 80 – 90 % предел текучести достигает 980 – 1170 МПа, а предел прочности 1170 – 1370 МПа при сохранении достаточно высокой пластичности. Очевидно, что этот способ упрочнения применим лишь для таких видов изделий, как тонкий лист или лента, проволока.

Если термическая обработка в сталях аустенитного класса существенно не изменяет механические свойства и достаточно проста, то в стали переходного, аустенитно-мартенситного класса прочность сильно зависит от режимов термической обработки, так как при этом существенно изменяется структурное состояние. Режимы термической обработки сталей переходного класса отличаются большой сложностью.

Нержавеющие стали этого класса получили применение главным образом как высокопрочные. Наиболее упрочненное состояние получается при структуре аустенит + мартенсит отпуска.

Подобное структурное состояние получается в результате следующей термической обработки: закалка на аустенит + обработка холодом + отпуск (старение). Обработка холодом приводит к превращению приблизительно 40 % аустенита в мартенсит (точка  $M_n$  должна быть около 0 °С); отпуск при

450 – 500 °С повышает прочность за счет дисперсного твердения, происходящего главным образом в  $\alpha$ -фазе [9].

### **1.3 Микродеформационные механизмы, действующие в высокомарганцевых аустенитных сталях под воздействием нагрузки**

Высокомарганцевые аустенитные стали, являются альтернативой магниевым (Mg) и алюминиевым (Al) сплавам и в настоящее время нашли широкое техническое применение в таких видах промышленности, как автомобильная, железнодорожная и горнодобывающая. Тем не менее, этот класс сталей отличается сложными микроструктурными взаимодействиями во время деформации, которая делает механические свойства и деформационное поведение трудно предсказуемым для любой микроструктуры. Поэтому они до сих пор подвергаются многочисленным исследованиям.

Главным образом эти исследования сосредоточены на стали Гадфильда с процентным содержанием углерода 1 – 1,4 % и 10 – 14 % марганца. Она обладает стабильной аустенитной микроструктурой с гранцентрированной кубической (ГЦК) решеткой, представляя собой хорошее сочетание высокой прочности и значительной пластичности в дополнение к высокой степени износа и сопротивления трению. Одним из важных выводов, сделанных из предыдущих работ, было то, что малая энергия дефектов упаковки способствовала образованию двойников деформации. Они обеспечивают эффективные барьеры для скольжения дислокаций, что способствует значительному деформационному упрочнению [11]. С другой стороны, энергия дефектов упаковки увеличивается за счет легирования стали, такими элементами, как алюминий (Al) и кремний (Si). Это способствует пластической деформации с преобладанием скольжения при уменьшении вклада двойников и дефектов упаковки в общее упрочнение [11]. Тем не менее, даже в случае высокой

энергии дефектов упаковки, взаимодействие между дислокациями с разными особенностями микроструктуры такими, как дислокационные стенки, способствует быстрой деформации и упрочнению в этом классе сталей [11].

В дополнение к энергии дефектов упаковки, температура деформации и динамическое деформационное старение также оказывают существенное влияние на режим закалки высокомарганцевых (Mn) сталей. Во-первых, с увеличением температуры преобладающим механизмом деформации становится скольжение [11] и, таким образом, из-за затрудненного взаимодействия с двойниками и двойниковыми границами, способность материала принимать закалку снижается. Кроме того, взаимодействие между атомами углерода в кластерах C – Mn и дислокаций, а также переориентация атомов углерода в ядрах дислокаций приводит к динамическому деформационному старению и улучшает способность упрочнения стали Гадфильда, препятствуя движению дислокаций [11].

Все эти исследования стали Гадфильда с относительно высоким содержанием марганца (13 – 30 % Mn) привели к высокой пластичности стали за счет развития двойникования или ТВИП – эффекта [11]. Этот класс сталей обладает отличным сочетанием высокой прочности и пластичности: чаще всего при высоких скоростях деформации ТВИП – стали при различных температурах обладают прочностью до 1500 МПа, удлинением до 90 %, а также высокой ударной вязкостью в пределах от 90 до 120 Дж/см<sup>2</sup> [10]. В дополнение к этим превосходным механическим свойствам, ТВИП – стали обладают относительно низкой плотностью ( $\rho \approx 7,3$  г/см<sup>3</sup>), и гораздо более высокой емкостью поглощения энергии (0,5 Дж/мм<sup>3</sup>), чем у обычных сталей с типичными значениями плотности и энергии поглощения 7,8 г/см<sup>3</sup> и 0,25 Дж/мм<sup>3</sup> соответственно [11].

Во многих исследованиях сообщалось, что образование двойников, сопровождающееся дополнительными микромеханизмами такими, как дефекты упаковки, динамическое деформационное старение и взаимодействие скольжения и двойникования, преобладает над

деформационным откликом ТВИП – сталей, где роль дислокационного скольжения остается довольно ограниченной [11]. В частности, в начале пластической деформации двойники начинают образовываться в виде нано - и микродвойников, далее увеличиваются во время пластической деформации, образуя двойниковые границы. В материалах, которые только деформированы дислокационным скольжением, средней длиной свободного пробега дислокаций является функция плотности границы зерна и взаимодействие дислокаций. Тем не менее, в случае ТВИП – стали границы двойников, сформированные в микроструктуре, также играют важную роль. В частности, средняя длина свободного пробега дислокаций уменьшается за счет увеличения границ двойников, которые действуют как сильные препятствия против дислокационного скольжения и говорят о заметном деформационном упрочнении в ТВИП – сталях [11]. Это известно как ТВИП – эффект, который запускается при низких или средних значениях энергии дефектов упаковки ( $12 - 35 \text{ МДж/м}^2$ ) [11]. ТВИП – эффект и микроструктурные взаимодействия, приостанавливают наступление разрушения, поскольку они являются препятствиями для дислокаций скольжения, в результате высокий предел прочности на разрыв сочетается одновременно с высокой пластичностью [11].

Вышеупомянутые исключительные механические характеристики ТВИП – стали отмечаются в различных исследованиях, которые посвящены механическим свойствам при растяжении [11], поведению деформации и соответствующим микромеханизмам [11], усталости [11], влиянию легирующих элементов [11] и разрушению [11] высокомарганцевых ТВИП – сталей. ТВИП – стали имеют высокую способность к деформационному упрочнению вследствие взаимодействия ТВИП – скольжения при растяжении или сжатии. Тем не менее, есть ограниченный ряд исследований эволюции микроструктуры в высокомарганцевых сталях при высокой скорости деформации [11]. Несмотря на это, Вэн и др. [11] и Токер и др. [11] сообщают о деформации

поведения аустенитной высокомарганцевой стали нового поколения при ударной нагрузке. По имеющимся у авторов сведениям, детальный анализ эволюции микроструктуры высокомарганцевых сталей при ударной нагрузке, которая устанавливает как температуру, так и химическую зависимость состава, еще не проводился.

Условия нагрузки такие, как температура деформации и скорость, и химический состав материала, играют решающую роль при определении доминирующего механизма деформации.

В настоящее время ряд экспериментов открыл место для исследования сложной реакции деформации высокомарганцевых аустенитных сталей, с образованием двойников по различным механизмам, с приложениями ударной нагрузки в широком диапазоне температур. Было показано, что образование двойников значительно способствует общему упрочнению высокомарганцевых аустенитных сталей вследствие прогрессирующего характера взаимодействия ТВИП – скольжения, так как двойники образуются на ранних стадиях деформации и начинают взаимодействовать со скользящими дислокациями [11]. При повышенных температурах деформация осуществляется за счет скольжения и двойникования, а при понижении температуры преобладает процесс формирования нанодвойников.

#### **1.4 Влияние дробеструйной обработки на метастабильные аустенитные нержавеющие стали**

Метастабильные аустенитные нержавеющие стали можно рассматривать как ТРИП – (пластичность, наведенная превращением) стали, потому что образование пластической деформации, либо в процессе формирования, либо в условиях эксплуатации, может привести к деформационному превращению аустенита в мартенсит [12]. Два типа мартенсита могут образовываться в аустенитной нержавеющей стали:  $\epsilon$  и  $\alpha'$ ,  $\epsilon$  – мартенсит имеет гексагональную плотноупакованную

кристаллографическую структуру, в то время как  $\alpha$ -фаза имеет объемно-центрированную кубическую решетку [12]. Последовательность трансформации можно представить как  $\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha'$  [12]. С другой стороны, прямая трансформация аустенита в  $\alpha'$ -мартенсит ( $\gamma \rightarrow \alpha'$ ) также наблюдается [12]. Эти фазовые превращения могут выступать в качестве упрочняющих механизмов, которые делают эти стали возможными для использования в автомобильной промышленности, в частности, для строительства кузовов, потому что они сочетают в себе отличную формуемость и способность к поглощению внешней энергии вместе с хорошей коррозионной стойкостью [12].

Среди самых разнообразных обработок поверхности, дробеструйная обработка является одним из наиболее широко используемых методов для повышения прочности и усталости металлических частей в широком диапазоне отраслей промышленности таких, как автомобильная, аэрокосмическая и нефтехимическая [12]. Эта обработка позволяет формировать напряжения сжатия в поверхностном слое, которые препятствуют появлению трещин, а также создают эффект залечивания уже имеющихся трещин и исключают их распространение [12]. Недавние исследования [12] показали, что образование слоя нанозерен на поверхности образцов приводит к улучшению усталостной прочности. Тем не менее, это верно до тех пор, пока плотность и размер поверхностных дефектов, вызванных дробеструйной обработкой, не являются значительными [12].

Многочисленные исследования показали благотворное влияние дробеструйной обработки на аустенитные нержавеющие стали [12], описывая роль остаточных напряжений на усталостную долговечность. Тем не менее, существует мало информации, связанной с метастабильными аустенитными нержавеющими марками. Клебер и др. [12] измеряли содержание мартенсита, индуцированного дробеструйным упрочнением, в зависимости от глубины поверхности. В настоящей работе были изучены отношения между микроструктурными изменениями, вызванными дробеструйной обработкой и

поведение усталости метастабильной стали. Были выбраны два различных состояния стали: отожженная (с полностью аустенитной микроструктурой), и холоднокатаная (с двухфазной микроструктурой, составленной из аустенита и мартенсита). Влияние дробеструйного упрочнения оценивали не только с учетом индуцированного мартенсита, но и влияния ранее существовавшего мартенсита, полученного при холодной прокатке.

Ряд авторов продемонстрировали, что сильная пластическая деформация может приводить к уменьшению размеров зерен на несколько порядков: чистые металлы могут быть доведены до максимума 140 нм [12], дисперсионные сплавы до 50 нм [12] и сплавы на основе твердых растворов до 26 нм [12].

Влияние дробеструйного упрочнения на метастабильную аустенитную нержавеющую сталь было проанализировано на той же марке стали, но с учетом двух ранее существовавших марок  $\alpha$ -мартенсита: менее 3 % для отожженного состояния и 38 % для холоднокатаного материала. Основные выводы, сделанные в результате исследования, можно обобщить следующим образом:

- Дробеструйное упрочнение вызывало более высокую пластическую деформацию на отожженных образцах, как следствие, демонстрировало более высокую шероховатость и большую толщину закаленного слоя.

- Обширный аустенит-мартенситный фазовый переход был измерен для отожженного состояния после дробеструйной обработки, достигнув 30 % – ного увеличения. Для холоднокатаных образцов наличие ранее существовавшего  $\alpha'$  – мартенсита сильно замедляло долю мартенсита, индуцированного дробеструйным упрочнением.

- Поперечный разрез образцов с дробеструйным упрочнением, выполненных сфокусированным ионным пучком, выявил образование ультра мелкозернистого слоя толщиной 0,5 – 1 мкм на поверхности, как для изученных стальных условий.

– Высокая шероховатость и микротрещины, образующиеся при дробеструйной обработке, явно обусловили усталостное поведение отоженных образцов. Поэтому после дробеструйного упрочнения были получены аналогичные или даже более низкие пределы усталости.

– Напротив, отсутствие микротрещин позволило значительно улучшить предел усталости для образцов с дробеструйной обработкой в холодном прокате, поскольку расстояние от инжектора является наиболее влиятельным параметром, а затем в порядке важности с учетом скорости выстрелов и коэффициента охвата соответственно.

### **1.5 Влияние лазерного оплавления стали 316L на микроструктуру и свойства**

За последние несколько десятилетий аддитивное спекание деталей значительно изменилось от лабораторного производства до изготовления промышленных функциональных деталей [13]. Для металлов существуют две распространенные технологии лазерного спекания: селективное лазерное плавление [13] и прямое лазерное нанесение [13] (лазерное проектирование сетчатой формы). В первом способе детали создаются путем нанесения послойных дорожек порошка (расплава) на первоначальную подложку. Прямое лазерное нанесение продемонстрировало способность эффективно изготавливать широкий спектр материалов: титановые сплавы, инструментальные стали, аустенитные стали, мартенситные стали, суперсплавы на основе никеля и сплавы на основе кобальта [13].

Существует много параметров процесса, которые могут быть выделены и проконтролированы во время прямого лазерного нанесения. Это мощность лазера, относительная скорость перемещения лазера, скорость подачи порошка, толщина слоя и пространство штриховки (расстояние от дорожки к дорожке). Эти параметры влияют на форму и динамику ванны расплава, вызванные лазером, и степень локализованного нагрева (и

охлаждения) в процессе прямого лазерного нанесения - таким образом, влияя на микроструктуру создаваемых деталей [13].

Успех прямого лазерного нанесения и неизбежная термическая история деталей также зависят от параметров «дизайна» таких, как: ориентация детали во время сборки, количество/размер деталей (или общий объем детали), сложность деталей (например, постоянное или поперечное сечение) и стратегии/шаблона сканирования. Некоторые параметры дизайна, такие как сложность/размер детали, ограничиваются механизмом прямого лазерного нанесения и камерой печати, в то время, как другие могут быть установлены до или во время прямого лазерного нанесения – например, ориентация детали и стратегия / шаблон сканирования.

В [13] основное внимание уделяется микроструктурным характеристикам и механическим свойствам (т.е. растяжению, сжатию и микротвердости) нержавеющей стали 316L при прямом лазерном нанесении и их зависимости от термической истории, которая контролируется через два разных межслоевых интервала времени и после термической обработки прямого лазерного нанесения.

Результаты показывают, что межслойные (и внутрислойные) интервалы времени, испытываемые во время прямого лазерного нанесения, оказывают существенное влияние на термическую историю и, следовательно, обремененную микроструктуру (т.е. размер и морфологию зерна) и механические свойства (т.е. напряжение, сжатие и микротвердость) нержавеющей стали 316L с прямым лазерным нанесением. По результатам работы авторами были сделаны следующие выводы:

1. Более длинные интервалы времени между слоями увеличивают скорость охлаждения/затвердевания вдоль каждого слоя, что приводит к более тонкой микроструктуре и более высоким пределам текучести и предела прочности при растяжении, а также к более низкому удлинению до разрушения.

2. Каждый слой обладает уникальной термической предысторией, при этом слои вблизи монтажной пластины испытывают больше термических циклов относительно конечных осажденных слоев.

3. Термическая обработка увеличивает размер зерна, что приводит к снижению предела прочности при растяжении и микротвердости. Показано, что образцы с термообработкой являются более пластичными по сравнению со стандартными образцами.

4. По мере увеличения скорости кристаллизации ванны расплава формируются различные микроструктуры. Обнаруживаются как крупнозернистые столбчатые зерна с меньшей микротвердостью, так и мелкие равноосные зерна с более высокой микротвердостью сосредоточенные вблизи центральной части заготовки.

5. Никаких существенных различий между девятистрочными образцами и одиночными образцами не наблюдалось в отношении объемной доли аустенита и ферритной фазы или распределения химического состава.

6. Механические свойства образцов, полученных методом лазерной инженерии и имеют более высокий предел прочности и текучести по сравнению с их литыми и деформированными аналогами, что объясняется более высокими скоростями охлаждения, присущими прямому лазерному нанесению.

## **1.6 Зависимость скорости наноиндентирования аустенитных зерен в метастабильных нержавеющей сталях**

Аустенитные нержавеющей стали широко используются в качестве конструкционных материалов для многих промышленных применений таких, как трубопроводы теплоносителя реактора, железнодорожные вагоны, кузова грузовиков из-за их превосходных механических свойств и коррозионной стойкости [14]. Эти стали содержат стабилизирующие аустенит элементы, такие как Mn, Ni и N, которые при добавлении в достаточных концентрациях

сохраняют аустенитную фазу при комнатной температуре [14]. Однако она может превращаться в мартенсит во время холодной обработки. Эти свойства обусловлены деформационно – индуцированным мартенситным превращением.

Метастабильные аустенитные нержавеющие стали подвергаются фазовому превращению от  $\gamma$  – аустенита до  $\epsilon$  – и  $\alpha'$  – мартенситов [14]. Мартенситные фазы вызывают изменения объема:  $\alpha'$ -мартенсит - объемное расширение 1 – 4 %, а  $\epsilon$  – мартенсит – сокращение объема. Зародыши  $\alpha'$  – мартенсита формируются на дислокационных скоплениях, а зародыши  $\epsilon$  – мартенситные на дефектах упаковки [14].

В [14] представлены экспериментальные результаты, показывающие зависимость между твердостью и кристаллографической ориентацией отдельных зерен аустенита, с целью обеспечения микромеханического понимания механического поведения метастабильных аустенитных нержавеющих сталей. Наноиндентирование использовалось для определения механических свойств отдельных зерен и активации различных механизмов деформации, включая фазовое превращение.

Исходная микроструктура стали содержала двойники в отдельных аустенитных зернах, размер которых составляют 40,75 мкм в виде крупных зерен и 5,71 мкм в виде мелких зерен, также наблюдаются некоторые мартенситные пластинки, гетерогенно распределенные в матрице.

Для некоторых конкретных кристаллографических ориентаций деформация, вызванная наноиндентированием, может вызвать поворот решетки. Это явление в последнее время привлекло внимание и обсуждалось рядом авторов [14] и объясняется различными активными системами скольжения, обусловленными геометрией индентора, вызывающим постепенное изменение оси нагружения при вдавливании [14].

Оценка кривых нагрузки-разгрузки для вдавливания для одиночных углублений, выполненных для различных кристаллографических ориентаций: (001), (101) и (111) показала, зерно  $\gamma$  (111) достигает более

высокой нагрузки, чем зерно  $\gamma$  (001), что означает, что (111) зерна аустенита более твердые. Модуль упругости также зависит от ориентации зерен [14]. Однако в настоящем исследовании относительный размер углублений по сравнению с размером зерна не может гарантировать, что упругое поле было ограничено одним зерном, и поэтому среднее значение  $E$  фактически было измерено. Напротив, пластическое поле меньше, чем размер зерна, и показатели твердости соответствуют одиночным зернам.

Поле пластической деформации, создаваемое во время наноиндентирования, ограничено отпечатком, взаимодействующим с несколькими зернами. В данном конкретном случае никакое фазовое преобразование (от  $\gamma$  до  $\alpha'$ ) не может быть оценено под отпечатком.

Оценка износа для различных аустенитных кристаллографических ориентаций ( $\gamma$  (001),  $\gamma$  (101) и  $\gamma$  (111)), а также для мартенситной фазы показывает, что зерна  $\gamma$  (111) могут иметь коэффициент износа, аналогичный значению мартенситной фазы. Это поведение может быть связано с микроструктурными и деформационными факторами (то есть границами зерен, двойниками, неоднородностями по химическому составу вдоль зерна и т. д.), которые играют важную роль в процессе вдавливания. В этом смысле необходимы дальнейшие исследования, чтобы прояснить реальный вклад каждого фактора.

Твердость зерен аустенита определялась как функция ориентации кристалла. Статистический анализ данных из 640 наноиндентаций показал, что твердость (001) и (101) была ниже, чем зерен (111), тогда как модуль упругости оставался постоянным и составлял 200 ГПа. Трансформация из аустенита в мартенсит наблюдалась как следствие сложных полей напряжений, индуцированных наноиндентированием, представляющих собой линзовидную форму вокруг отпечатка.

## **1.7 Особенности развития деформации и разрушения аустенитных сталей при динамическом нагружении**

Для более тщательного изучения механизмов деформации аустенитных сталей при динамическом нагружении необходимо рассмотреть процессы трения, воздействие на материал пикового напряжения и воздействие сильноточных пучков на поверхность.

В процессах трения напряжения сдвига, смятия, изгиба и контактные напряжения играют основную роль на особенности развития деформации и изнашивание материала. Изнашивание является сложным физико-химическим процессом, который зависит от многих факторов, таких как свойства материала, качество трущихся поверхностей, скорости их взаимного перемещения, вида трения, нагрузки, смазочных материалов, температуры. Основными характеристиками для материала от которых зависит интенсивность изнашивания являются шероховатость поверхности и твёрдость. Оптимальная шероховатость достигается с помощью шлифования и полирования. Твёрдость материалу придаёт легирование, термическая обработка, наплавка, напыление, пластическая деформация и др.

Улучшение износостойкости возможно при получении ультрамелкозернистых (УМЗ) и наноструктурированных материалов. Для получения таких материалов применяют различные виды интенсивной пластической деформации (ИПД). Сегодня для этого применяют следующие виды ИПД: равноканальное угловое прессование (РКУП), кручение под высоким давлением (КВД), многоосная ковка, станочная обработка, механическое истирание, динамическая пластическая деформация, а также многократная прокатка с высокой степенью обжатия (после каждой прокатки лист сворачивается) [15,16]. Возможно и комбинированное применение ИПД для получения УМЗ и наноструктурированных материалов [15].

Какими свойствами будет обладать материал после интенсивной пластической деформации будет зависеть от её вида, поскольку это влияет на

структуру материала, которая, в свою очередь, оказывает большое влияние на поведение при изнашивании. В [15] пытались получить износостойкую с хорошей электропроводностью УМЗ медь с применением равноканального углового прессования и кручения под высоким давлением, а также комбинированной обработкой РКУП с последующим КВД. Но полученная ультрамелкозернистая медь такими способами не обладает повышенной износостойкостью по сравнению с крупнозернистой медью. Это связано с повышенной хрупкостью УМЗ меди при ударных нагрузках, что ведёт за собой быстрое образование продуктов износа, которые увеличивают интенсивность изнашивания. Однако механическое истирание поверхностных слоёв и динамическая пластическая деформация повышают износостойкость меди [15].

Исходное состояние материала перед ИПД оказывает также огромное значение на его механические свойства. Так низкоуглеродистые стали с мартенситной исходной структурой с последующим РКУП получают большее упрочнение, чем стали с ферритной и феррито-перлитной исходными структурами и той же обработкой [16].

Аустенитные стали прежде всего являются высоколегированными. Это вносит большой вклад в упрочнение сталей данного структурного класса, а также придания им специальных свойств. В процессе изнашивания аустенитных сталей происходят структурные и фазовые превращения в их поверхностных слоях.

Легированные элементы, такие как углерод, марганец, молибден и хром в марганцовистых аустенитных сталях влияют на сопротивление износу. Стали, содержащие 1 – 1.2 мас. % углерода, 5 – 9 мас. % марганца и 1 – 2 мас. % молибдена, в настоящее время применяются в технике в качестве материала для деталей горного оборудования и строительных машин, подвергающихся воздействию трения и абразивному изнашиванию [17]. Износостойкость данных сталей при абразивном изнашивании заметно выше износостойкости стали Гадфильда, это обусловлено образованием в их

поверхностных слоях при нагружении  $\alpha$ -мартенсита деформации. На сопротивление изнашиванию метастабильных аустенитных сталей оказывают влияние прочностные свойства возникающего в них мартенсита деформации, а также сопротивление разрушения мартенсита в условиях воздействия значительных динамических локальных напряжений в зоне контакта [17].

Увеличение содержания марганца от 6 до 12 мас. % в метастабильных аустенитных сталях (МАС) снижает износостойкость, что обусловлено отрицательным влиянием данного элемента на сопротивление мартенсита деформации разрушению в условиях контактного нагружения. Так, например, сталь Гадфильда обладает невысокой абразивной стойкостью вследствие исходной низкой твёрдости. Аустенит в этой стали более стабилен и хорошо наклёпывается, а вот мартенситное превращение здесь практически отсутствует [17, 18]. В МАС с содержанием марганца свыше 6 мас. % и до 4 мас. % хрома при диссипации энергии трения в слое приработки возникают сложные процессы, связанные с наклёпом аустенита, деформационным мартенситным превращением и деформационным старением  $\alpha$  – мартенсита. В таких сталях при изнашивании мартенситное превращение возникает в более тонком приповерхностном слое, чем весь слой приработки. В результате образуется очень твёрдый подслоя, препятствующий проникновению абразивных частиц в поверхность изнашивания, благодаря чему происходит уменьшение интенсивности износа. Хромомарганцевые МАС обладают высокой износостойкостью вследствие замедленного протекания процесса деформационного динамического старения мартенсита и локализации этого процесса в более тонком приповерхностном слое, глубина которого соизмерима с размерами частиц продуктов износа [18].

Также непосредственное влияние на сопротивление износу оказывает содержание углерода в аустените. Несмотря на то, что с увеличением количества углерода в стали её твёрдость увеличивается из-за дисперсного

твёрдения, аустенитные стали, содержащие около 0.7 мас. % углерода, обладают большей износостойкостью, чем аустенит стали 110Г13. Этот факт обусловлен благоприятным сочетанием двух механизмов упрочнения: упрочнение за счёт наклёпа  $\gamma$  – фазы и упрочнение за счёт образования некоторого количества мартенсита деформации [19].

Воздействия на аустенитные стали ионного и электронного облучения, вызывающие плавление поверхностного слоя, ведущее к структурным и фазовым превращениям в нём, упрочняют поверхность и увеличивают её сопротивляемость износу. Так, например, в [20] исследовали влияние интенсивного импульсного воздействия ионного пучка на свойства износа закалённой быстрорежущей стали. С помощью такой технологии исследователям удалось добиться повышение износостойкости в 2 раза. Они объясняют это образованием метастабильных фаз, снижением доли мартенсита и увеличением аустенитной фазы. Также за счёт плавления в результате облучения ионным пучком происходит перераспределение дислокаций и образование более дисперсных карбидов [20].

Из вышесказанного следует, что на износостойкость материала влияет огромное количество факторов. Для улучшения свойств износа стали в первую очередь необходимо подобрать оптимальный химический состав. Далее основную роль играет технология получения и обработки стали. Высоким свойствам износа соответствуют стали, обладающие большой твёрдостью и низким значением параметра шероховатости. Твёрдость стали связана с размером зерна, который можно регулировать в процессе получения или с помощью специальной обработки. К таким обработкам относятся различные виды напыления и наплавов, термообработка, а также механическая обработка. В качестве механической обработки применяются интенсивная и динамическая пластические деформации, которые дают возможность получить ультрамелкозернистую сталь с хорошими прочностными характеристиками и высокой износостойкостью.

При трении разрушающие напряжения испытывают поверхностные слои, поэтому нет необходимости упрочнять деталь, работающую в условиях износа, по всему объёму, если только это не является конструкторским требованием. В этом случае применяют поверхностное упрочнение используя такие методы, как химическая обработка, напыление, наплавка и облучение ионным и электронным пучком. При напылении и химической обработке на поверхности детали образуются высокопрочные нитриды, карбиды, бориды, придающие материалу износостойкость. Наплавку в ряде случаев используют для восстановления износившейся поверхности. Для увеличения срока службы деталей применяют наплавочные материалы, образующие износостойкие покрытия. Использование облучения ионным или электронным пучком приводит к плавлению поверхности в результате чего могут происходить фазовые и структурные превращения и перераспределение линейных дефектов.

В технике и промышленности в качестве износостойких материалов применяют аустенитные стали и сплавы, поскольку они хорошо сопротивляются износу благодаря происходящим в этих сталях превращениям в процессе трения. Метастабильные аустенитные стали в условиях износа испытывают мартенситное превращение с последующим деформационным его старением. Стали, стабильные по отношению к  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращению при деформации, упрочняются при трении за счёт наклёпа аустенита. Очень важное значение для аустенитных сталей, работающих в условиях износа, имеет химический состав.

Ниже рассмотрим поведение аустенитных сталей в условиях высокоскоростного деформирования. При рассмотрении механизмов деформации при квазистатическом нагружении высокомарганцевой аустенитной стали, было обнаружено, что повышение скорости деформации до  $1 \text{ с}^{-1}$  приводит к одновременному повышению пластичности и прочности данной стали. Это связано с повышением плотности двойников и образованием новых систем двойникования, способствующих большему

упрочнению и увеличению пластичности металла. Стоит предположить, что и при больших скоростях деформации данная сталь будет вести себя подобным образом, то есть будут увеличиваться её прочность и пластичность из-за повышения плотности двойников. В действительности первые исследования в этой области [21, 22] подтвердили это. В данных исследованиях высокоскоростную деформацию до  $10^6 \text{ с}^{-1}$  получали с помощью метания пластины под влиянием на неё высокого давления 50 МПа и взрывной волны, результаты сравнивали со статически деформированной пластиной со скоростью деформации  $10^2 \text{ с}^{-1}$  на 500 – тонном прессе.

Увеличение пикового давления ударной волны приводит к существенному повышению прочностных характеристик стали 110Г13Л. Упрочнение происходит в условиях отсутствия остаточной пластической деформации. Прохождение через материал ударных волн высокого давления вызывает в материале значительную мгновенную деформацию, о чём свидетельствуют большое количество линий скольжения и двойников. С увеличением пикового давления плотность следов деформации увеличивается при незначительном изменении их толщины [21, 22]. В то время как при статическом сжатии следы скольжения проявляются в макроскопических пачках толщиной 20 – 30 мкм. Отдельные микродвойники хорошо видны на фоне ячеистой дислокационной структуры после ударного воздействия при 8 МПа. Большие степени деформации приводят к образованию двойников, имеющих весьма несовершенный вид, так как возникают в матрице с большим количеством дислокаций. Широкие двойники состоят из пачек микродвойников, разделённых прослойками несдвойникованной матрицы. При одном и том же уровне упрочнения более развитая тонкая структура образуется при более высокоскоростном деформировании [21].

Рентгеноструктурные исследования стали Гадфильда показали, что увеличение степени упрочнения приводит к уменьшению периода решётки, причём при статическом нагружении этот параметр уменьшается больше чем

при динамическом воздействии. Уменьшение периода решётки происходит с выделением из аустенита избыточного углерода, что даёт возможность протеканию мартенситных превращений [21]. В таком случае мартенситное превращение может повысить упрочнение за счёт фазового наклёпа в большей степени при статическом нагружении. Несмотря на то, что после высокоскоростной деформации образуется более развитая тонкая структура, степень упрочнения после статического упрочнения может быть такой же.

Ударное упрочнение метастабильных аустенитных сталей происходит за счёт образования мартенсита деформации. Количество  $\alpha$  – мартенсита зависит от степени пластической деформации. В [23] установлено, что в сильнодеформированных зонах количество  $\alpha$  – фазы резко возрастает, что делает эту зону более прочной относительно остального объёма упрочнённого металла.

Высокоскоростная деформация материалов ( $10^6 \text{ с}^{-1}$ ) может быть получена при воздействии сильнофокусированного электронного пучка (СЭП) наносекундной длительности на поверхность мишени. При таком ударно-волновом нагружении происходит откол тыльной части мишени и испарение материала с фронта [24 – 26].

При воздействии на металлическую мишень мощного релятивистского электронного пучка наносекундной длительности происходит возбуждение и распространение нелинейных волн напряжения. Источниками возбуждения волн являются эффект термоупругости, вызванный быстрым расширением тонкого поверхностного слоя металла, разогретого до высоких температур, и импульс отдачи, обусловленный испарением материала в зоне облучения с последующим разлётом паров, что приводит к образованию лунки абляции на поверхности образца. Быстрый нагрев и охлаждение поверхностного слоя, приводят к его пластической деформации, структурным превращениям и поверхностному упрочнению [27,28].

Исследователи в [29] упрочняли сплавы на основе железа при воздействии интенсивного импульсного электронного пучка с энергией электронов до 250 кэВ и длительностью импульса от мили- до наносекунд. В результате облучения образцов, материал поверхности оплавлялся на глубину, зависящую от величины энергии электронов. В связи с этим происходило образование двух пиков микротвёрдости по глубине. Появление слоёв материала с максимальной твёрдостью объясняется закалкой материала из жидкого состояния с большим градиентом температур и высокой скоростью охлаждения до  $10^7$  К/с. В этом слое образуется мелкодисперсная структура мартенсит. Второй пик твёрдости образуется вследствие закалки материала из твёрдого состояния. Между двумя максимумами присутствует зона с пониженной твёрдостью, по мнению авторов, причиной является отпуск. В результате такой обработки можно увеличить микротвердость в 3.5 раз и повысить износостойкость в 2 раза [29].

Эффект упрочнения металлов электронным пучком гораздо большей энергии (МэВ) изучался в [24 – 26]. Ударно-волновое нагружение СЭП приводит к интенсивной пластической деформации металла. В экспериментах с углеродистыми сталями было установлено, что такое нагружение приводит к мультиплетному двойникованию и объёмному квазипериодическому упрочнению мартенсита [24]. В процессе проникновения волны напряжений в глубь материала происходит её затухание. Поэтому степень деформации уменьшается по мере удаления от облучённой поверхности образца. По достижению ударной волной тыльной поверхности происходит её отражение и наложение с образованием амплитуды напряжений, которая вызывает тыльный откол мишени. Вблизи тыльной поверхности мишеней из углеродистых сталей образуются метастабильные фазы [24].

При облучении СЭП образцов меди и алюминия с различным размером зерна установлено, что в независимости от размера зерна на толщину откольного слоя влияет толщина мишени. Чем толще образец, тем

на большей глубине от тыльной поверхности волна напряжений достигает своей амплитуды, превышающей динамическую прочность материала происходит откол. Разрушение идёт не по сдвиговому механизму, как это наблюдается при квазистатическом нагружении, а происходит путём отрыва с образованием ямок отрыва различной величины. В мелкозернистой меди и алюминии вязкое разрушение осуществляется по границам зёрен. В мишенях с крупным зерном вязкое разрушение начинается зернограницным путём, а заканчивается по телу зерна [24, 25].

Динамический откол в образцах из стали Гадфильда носит характер смешанного вязкохрупкого интеркристаллитного разрушения, в то время как при квазистатическом нагружении и ударном изломе типичным является транскристаллитное разрушение. Причиной интеркристаллитного разрушения является локализация пластической деформации около границ зёрен, содержащих карбидную фазу. Смена механизмов деформации и разрушения при ударно-волновом нагружении происходит за счёт увеличения скорости деформации на порядок. В интервале деформаций  $\sim 10^3 - 10^4 \text{ с}^{-1}$  механизм деформации изменяется с термически активируемого дислокационного скольжения, проявляющегося при медленном нагружении, на нестабильное пластическое течение, обусловленное ускоренной генерацией дислокаций при деформациях больше  $10^4 \text{ с}^{-1}$  [26].

Итак, действие сильнофокусированных электронных пучков на металлические сплавы вызывает интенсивную пластическую деформацию. Возникающие волны напряжения проникают в глубь материала, происходит диссипация ударной волны. Вместе с затуханием волны напряжений происходит уменьшение степени деформации материала. Особенностью данного нагружения является тыльный откол мишени, возникающий при отражении ударной волны от тыльной поверхности и образовании амплитуды напряжений, превышающей динамическую прочность материала. Величина тыльного откола тем больше, чем толще образец. Происходит смена

механизма разрушения, образуются метастабильные фазы в околотыльной области. Максимальное упрочнение материал получает в поверхностном слое, соответствующему первому пику микротвёрдости. Снижение микротвёрдости от лицевой к тыльной поверхности согласуется с затуханием ударной волны. Около тыльной поверхности образуется второй пик микротвёрдости.

## **1.8 Концентрированные потоки энергии**

Концентрированные потоки энергии (КПЭ) – это методы обработки микро- и макроповерхностей материалов, где инструментом обработки являются частицы: электроны, фотоны, атомы, ионы, обладающие и свойствами волны, которые сконцентрированы в пучки сравнительно малых поперечных размеров. Минимальная плотность мощности энергии около  $10^3$  Вт/см<sup>2</sup> [30,31].

По общим физическим признакам все источники генерации КПЭ можно классифицировать на следующие виды (рисунок 4) [31]. В качестве источников КПЭ для наплавки и ударной обработки нашли широкое применение мощные импульсные лазерные, плазменные, ионные и электронные пучки.

Наиболее интенсивно развиваются методы модификации поверхности материалов с помощью облучения КПЭ с плотностью мощности  $W \approx 10^3 - 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> и длительностью импульса  $10^{-8} \dots 10^{-5}$  с. При воздействии концентрированных потоков энергии (КПЭ) реализуется сверхбыстрый нагрев (до  $1 \cdot 10^{12}$  К/с), плавление, испарение и сверхбыстрое ( $1 \cdot 10^{10}$  К/с) затвердевание материала. Эти процессы позволяют формировать в приповерхностном объеме материала аморфные и нанокристаллические структуры, метастабильные фазы, которые в традиционных технологических процессах невозможно получить. Кардинальные изменения структурно-фазового состояния поверхностных слоев могут обеспечивать улучшение

механических и физических свойств материала. Поэтому данные методы модификации поверхности металлических материалов являются перспективным направлением современного металловедения.

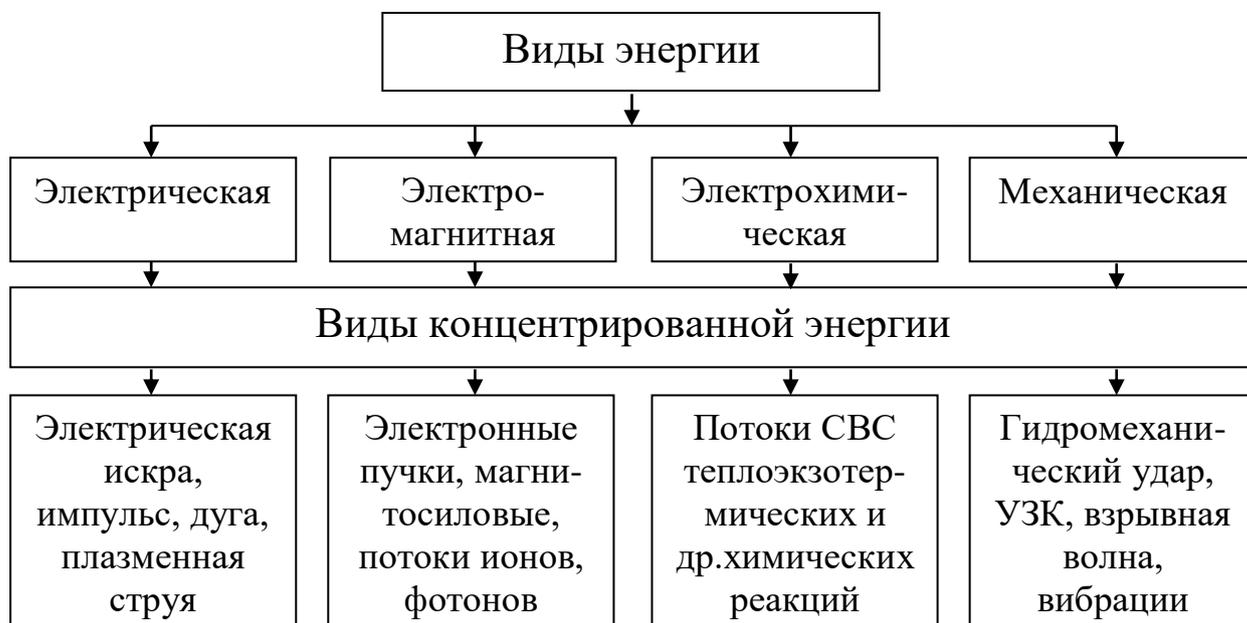


Рисунок 4 – Классификация видов КПЭ [31]

В качестве источников КПЭ для наплавки и ударной обработки нашли широкое применение мощные импульсные лазерные, плазменные, ионные и электронные пучки.

### 1.9 Постановка задачи

Из анализа литературы следует, что материалы, обладающие высоким сопротивлением разрушению при статических знакопеременных и динамических ударных нагрузках в широком интервале температур, способные к длительной эксплуатации, заслуживают большое внимание и представляют особый интерес. К таким материалам относятся хромоникелевые стали аустенитного класса: стали (стали 12X18H10T, 304, 304L). Сталь 304L представитель нержавеющей стали, работающая в условиях агрессивных сред от криогенных до 700 °С в условиях

квазистатического и динамического нагружения. Однако механизм ее деформации и разрушения в условиях многократного динамического нагружения не выяснен при условии, что в их структуре могут присутствовать дополнительные фазы ( $\delta$  – фаза).

Детальную информацию по характеру деформации и разрушения в условиях многократного нагружения может дать обработка стали 304LКПЭ. Они не только образуют лунку абляции на мишени, но и могут формировать ударную волну различной амплитуды (до 30 ГПа), распространяющуюся в объем материала. Это приводит как к объемному упрочнению, так и к тыльному отколу мишени [26].

Сильноточные электронные пучки являются источниками высокоскоростной деформации ( $\varepsilon \sim 10^6 \text{ с}^{-1}$ ), которая является причиной смены механизма деформации и разрушения ГЦК металлов [32]. Так, например, сталь Гадфильда при квазистатическом нагружении и ударном изломе разрушается по телу зерна, в то время как ударно-волновое нагружение СЭП вызывает интеркристаллитное разрушение, связанное с локализацией пластической деформации на границах зёрен, содержащих карбиды типа  $M_3C$  [26]. Для стали 304L облучение МЭП формирует неоднородное упрочнение по толщине мишени и откольное разрушение тыльной ее части при толщине образца меньше 9 мм. Однако такое динамическое нагружение может происходить многократно при толщинах мишени больше 9 мм. Реакция материала на такие воздействия остается открытой.

На основании вышеизложенного целью данной работы является исследование эволюции объемного упрочнения мишеней из стали 304L под влиянием многократного мегавольтного электронного луча.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– сделать анализ литературы по исследуемому вопросу и осуществить постановку задачи исследования;

- подготовить образцы и провести эксперименты по ударно-волновому нагружению мишеней МЭП с количеством импульсов от 1 – 6;
- построить графики распределения микротвердости вдоль оси пучка электронов с различным количеством импульсов воздействия;
- изучить эволюцию структуры стали 304L в зависимости от количества импульсов нагружения по толщине мишеней;
- провести анализ полученных результатов и дать рекомендации по дальнейшему исследованию.

## 2 Материал, оборудование и методы исследования

Материал. Образцы из стали 304L [(Fe – (18 – 20), Cr – (8 – 12), Ni – 2.0, Mn – 1.0, Si – 0.03, C – 0.03, S – 0.045 P, вес. %] имели форму пластин 20 мм × 20 мм толщиной 8 мм, вырезанных параллельно плоскости прокатки. Для получения однородной микроструктуры и уменьшения плотности дефектов образцы подвергали закалке от 1050 °С (2h) в воду. В исходном состоянии (после закалки) образцы имели структуру  $\gamma$  – твердого раствора (аустенит); средний размер аустенитного зерна составлял 25 мкм; присутствовали также выделения  $\delta$  – феррита, вытянутые вдоль направления прокатки, рисунок 5. В некоторых аустенитных зернах присутствовали двойники закалки.

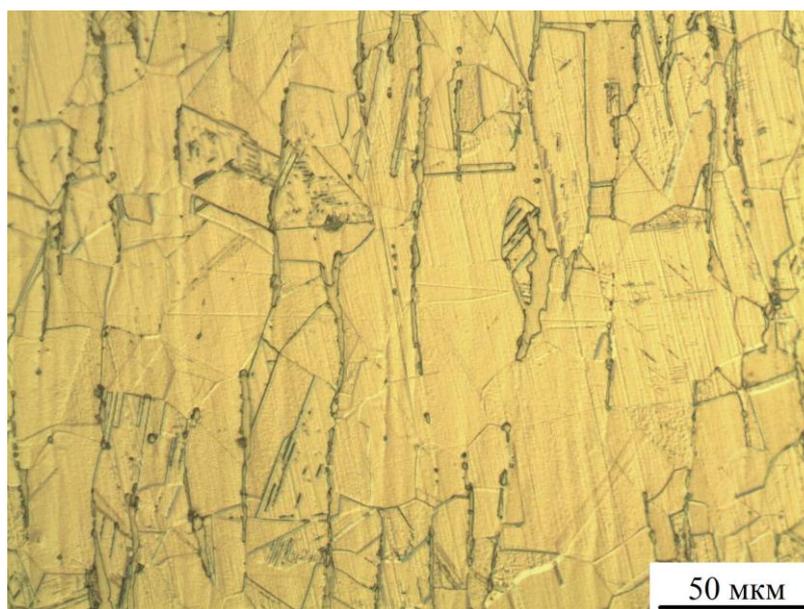


Рисунок 5 – Микроструктура исходных образцов стали 304L

Оборудование для динамического нагружения. В качестве генератора ударных волн использовали электронный ускоритель «СИНУС – 7». Электронный пучок формировался в вакуумном диоде со взрывоэмиссионным полусферическим катодом диаметром 6 мм (сталь типа 304) во внешнем продольном магнитном поле 17 кЭ. При напряжении на

катоде 1.35 МВ и зазоре между катодом и анодом 7 мм ток в диоде достигал 20 кА. Образцы (мишени) устанавливали за графитовой диафрагмой диаметром 8 мм и толщиной 3 мм в заземленном аноде. Тыльная поверхность образца оставалась свободной. Максимальная плотность тока пучка на мишени составляла 25 кА/см<sup>2</sup>, т.е. пиковая плотность мощности  $3.4 \cdot 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>; длительность импульса электронного тока на полувысоте 45 нс, а плотность падающей энергии 1.2 кДж/см<sup>2</sup>. Разброс амплитудных значений ускоряющего напряжения и плотности тока на мишени от импульса к импульсу не превышал 10 %. За счет объемного характера энерговыделения (пробег электронов и глубина зоны энерговыделения составляют ~ 1 мм) за один импульс происходила абляция материала мишени с образованием лунки диаметром ~ 7 мм. Средняя глубина лунки абляции, измеренная на поперечных шлифах на различных расстояниях от ее центра, составляла  $0.7 \pm 0.1$  мм. Это свидетельствовало о том, что радиальное распределение плотности тока пучка на мишени было близко к однородному. Количество импульсов нагружения варьировалось от 1 до 6. Для защиты мишени от абляции она дополнительно прикрывалась сменной пластиной из стали 12Х18Н10Т толщиной 2 мм. После одного или двух импульсов нагружения пластина заменялась на новую. Пластина притиралась к основной мишени, между ними вводилось вакуумное масло ВМ-1 и далее они плотно механически прижимались друг к другу. Внешний вид сборки представлен на рисунке 6. Толщина основной мишени из стали 304L была равна 8 мм.

Методы исследования. Эволюцию микроструктуры в образцах в направлении распространения УВ исследовали с помощью оптической металлографии (ОМ). ОМ проводили на поперечных шлифах, вырезанных вдоль оси пучка электроискровым методом. Для выявления микроструктуры использовали химическое травление: HNO<sub>3</sub> (1 об. часть) и HCl (3 об. части).

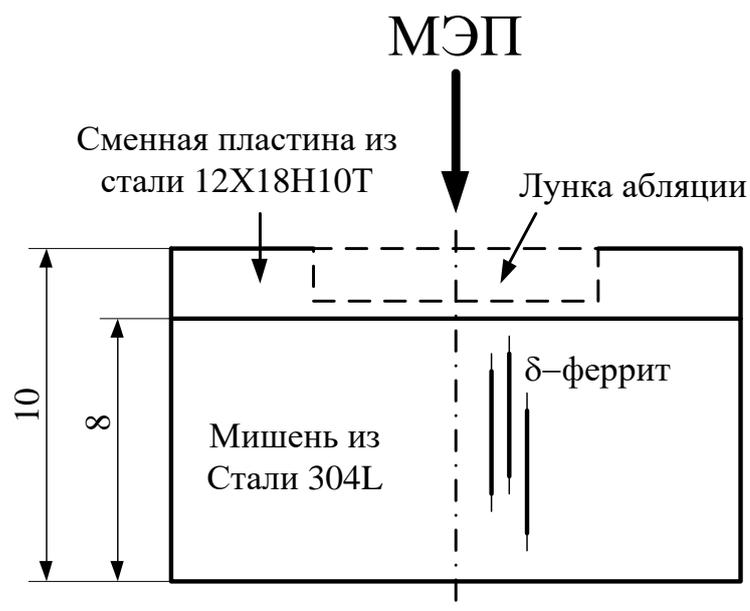


Рисунок 6 – Схема сборки мишени перед нагружением мегавольтным электронным пучком (МЭП)

Анализ микроструктуры образцов проведен с помощью оптического микроскопа Olympus GX51, снабженного анализатором изображений SIAMS 700. Микротвердость ударно-нагруженных образцов измеряли на приборе ПМТ – 3 на поперечных шлифах в две дорожки с шагом по глубине в каждой дорожке 100 мкм и смещением уколов между дорожками 50 мкм при нагрузке 0.981 Н.

### 3 Экспериментальная часть

Эксперименты, проведенные в [32, 33] показали, что максимальная толщина образцов, при которой УВ нагружение, инициируемое воздействием МЭП с указанными в п. 2. параметрами, не приводит к макроскопическому тыльному отколу, составляет  $\sim 9$  мм для стали 304L. Исходя из этого, эксперименты в данной работе проводили на образцах толщиной  $(8 + 2)$  мм (см. схему на рисунке 6). Это позволяло, с одной стороны, полностью исключить потери энергии УВ, связанные с отколом, а, с другой – оценить накопление двойников деформации в объеме материала от импульса к импульсу, и степень вовлечения в процесс двойникования фронтального, центрального и тыльного объема материала.

Однократное ударно-волновое нагружение стали 304L приводит к объемному упрочнению [32, 33]. Профиль микротвердости по глубине, имеет приповерхностный максимум, расположенный на глубине  $\sim 0.5 - 1$  мм от дна лунки абляции (рисунок 7,а), где, согласно расчетам для стали типа 304L (рисунок. 7,б), УВ сжатия имеет амплитуду  $\sim 18$  ГПа и длительность  $\sim 0.2 \mu\text{s}$  [34]. Положение приповерхностного максимума микротвердости удовлетворительно согласуется с расчетной толщиной зоны теплового влияния (ЗТВ) пучка. Величина этого максимума для стали 304L ( $\sim 2.9$  ГПа) близка к значениям, полученным в ранних экспериментах по ударному сжатию ( $2 \mu\text{s}$ , 15 ГПа) тонких (0.180 мм) предварительно отожженных образцов из стали 304L [35]. Отсюда можно заключить, что при амплитудах УВ 15 – 18 ГПа увеличение ее длительности интервале  $0.2 - 2 \mu\text{s}$  не приводит к существенному изменению степени упрочнения стали типа 304L. С тыльной стороны мишени наблюдается повышение микротвердости (тыльный пик HV) до 2.4 ГПа.

На рисунке 8 представлены профили микротвердости мишеней после 2...6 импульсов нагружения. Видно, что с тыльной стороны мишени наблюдается упрочнение материала не превышающее 2 – 2.4 ГПа.

Это обусловлено уменьшением амплитуды ударной волны до 2 ГПа (для мишени 10 мм) по сравнению с мишенью толщиной 9 мм (3,3 ГПа), рисунок 7,б.

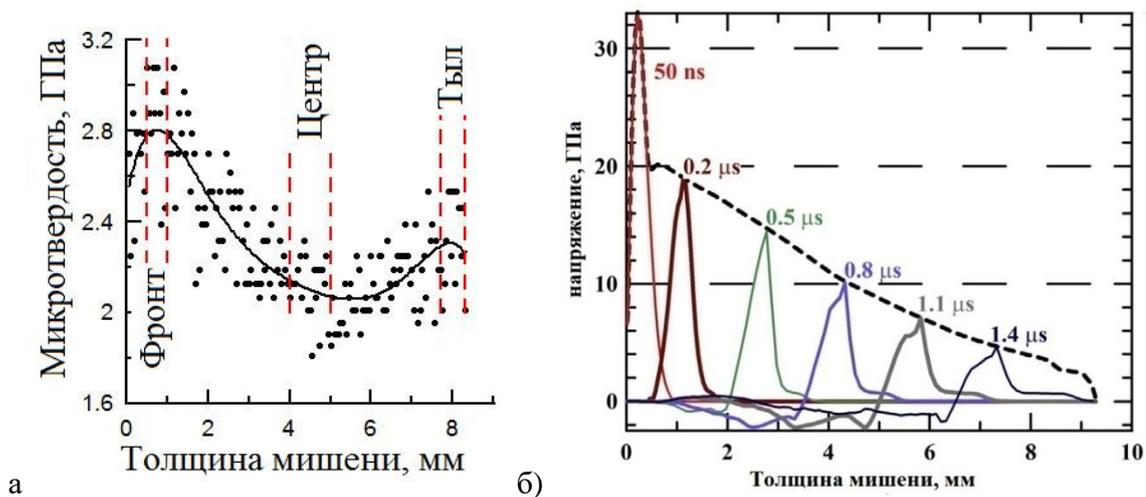


Рисунок 7 - Профиль микротвердости (а) по глубине (отсчет от дна лунки абляции) в ударно нагруженном образце стали 304L и изменение амплитуды ударной волны (б) в разные периоды времени при распространении ее в нержавеющую аустенитную сталь.

Исходная микротвердость стали 304L 1.55 ГПа[34]

Видно, что с увеличением числа импульсов облучения упрочнение со стороны фронта мишеней распространяется в их центральную часть (зона 2), рисунок 8, а–д. При этом с ростом числа импульсов облучения от 1 до 4 наблюдается рост средней величины микротвердости со стороны фронта, а далее с ростом импульсов она практически не меняется (е). В основном объеме зоны 3 средний уровень микротвердости практически не меняется, однако после 6 импульсов облучения наблюдается значительный разброс значений HV (д), что, по-видимому, связано с разной степенью вовлечения зерен в упрочнение. В приповерхностном объеме тыльной части мишени к 4 импульсам обработки твердость достигает 2.4 ГПа (в).

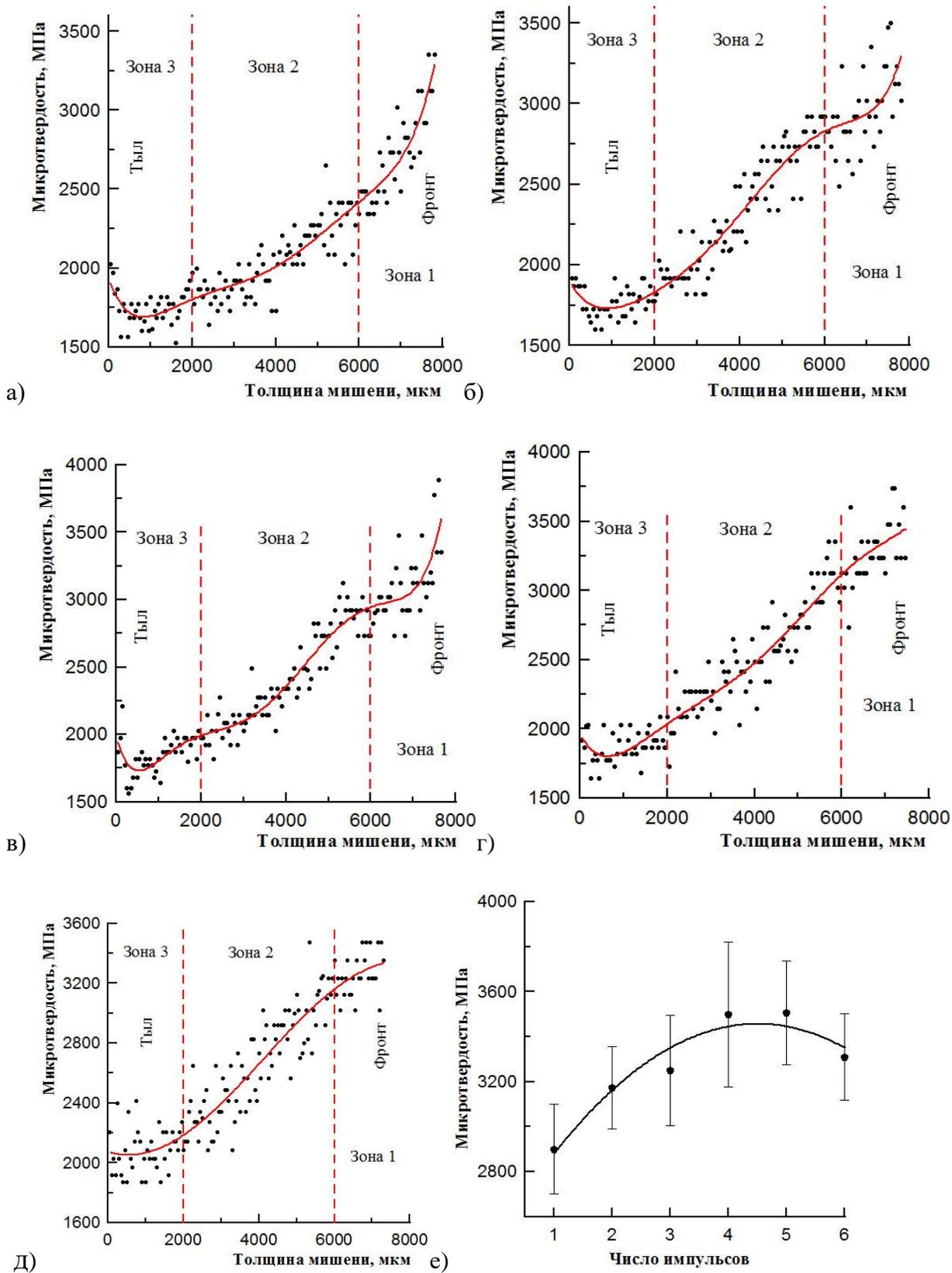


Рисунок 8 – Профили микротвердости по толщине мишени от числа импульсов нагружения (а - 2, б - 3, в - 4, г - 5, д - 6 импульсов нагружения) и изменение средней величины микротвердости для фронтальной (0.5 мм) части мишени от числа импульсов нагружения (е)

На рисунке 9 представлены ряд микроструктур мишеней после различного числа импульсов облучения в зонах 1 (фронт), 2 (центр) и 3 (тыл). Видно, что в зоне в 100 % зерен наблюдается интенсивное деформационное двойникование, о чем свидетельствуют выявленные травлением тонкие параллельные полосы внутри аустенитных кристаллитов. На рисунках 9, 10 и 11 приведен количественный анализ развития деформационного двойникования по зонам мишеней.

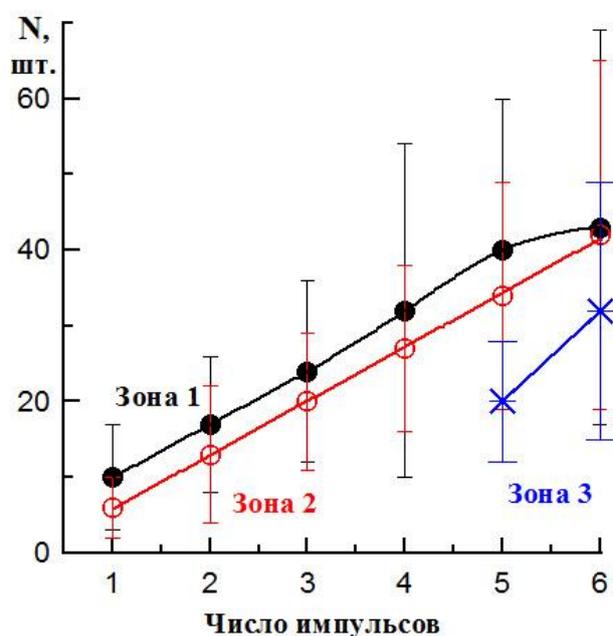


Рисунок 11 – Среднее количество двойников деформации в зерне по зонам от числа импульсов нагружения

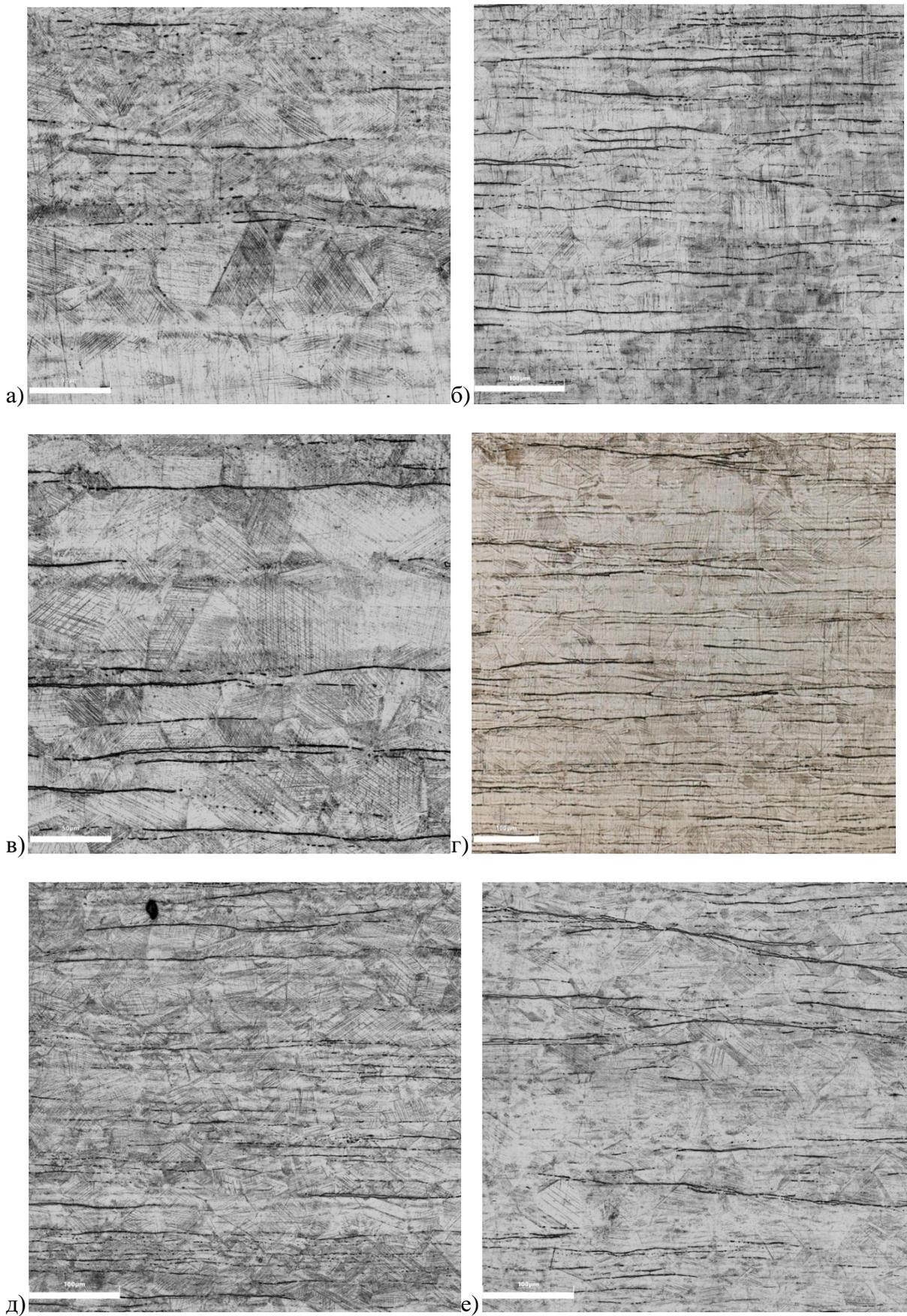


Рисунок 9 – Микроструктура мишеней из стали 304L после динамического нагружения; (а,б) – после 2, (в,г) – 4 и (д,е) – 6 импульсов нагружения. (а,в) – зона 1; (б,г,д) – зона 2 и (е) – зона 3

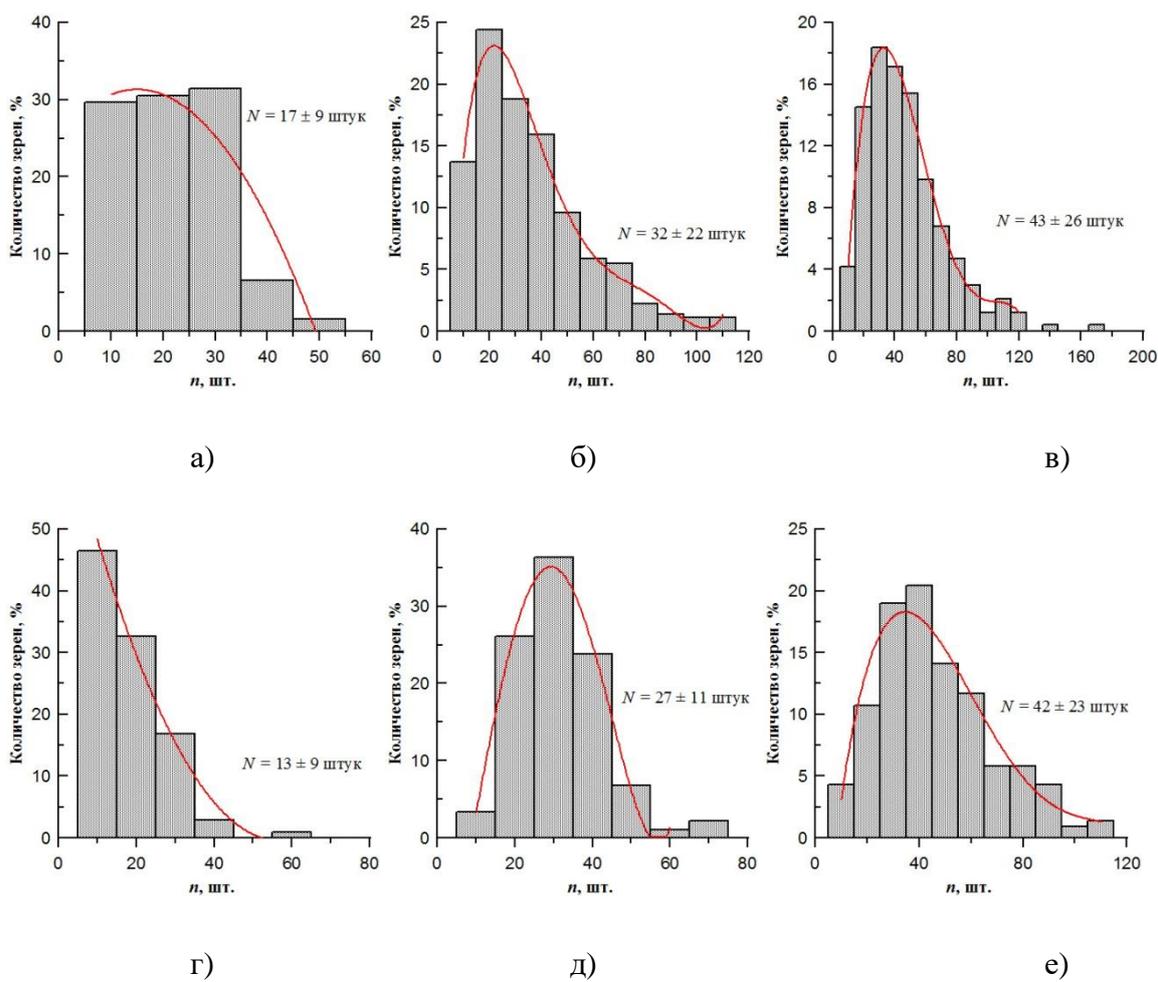


Рисунок 10 – Распределение количества двойников деформации в зернах; (а – в) – зона 1, (г – е) – зона 2; (а,г – 2, б,д – 4, в,е – 6 импульсов облучения)

Максимальная степень двойникования наблюдается в прифронтовом объеме первой зоны ( $h \sim 0.1 \dots 0.5$  мм), где формируется максимальный пик микротвердости. Здесь двойникованию подвергается от 95 до 100 % аустенитных зерен с увеличением числа импульсов МЭП от 1 до 6. На больших глубинах в зоне 1 независимо от числа импульсов облучения остаются не продеформированными  $\sim 25$  % зерен. В зоне 2 с увеличением импульсов обработки процент зерен без двойников уменьшается с 52 до 22 %. В зоне 3 деформационные двойники фиксируются только после 5 импульсов обработки, рисунок 11. При этом после 6 импульсов остаются не продеформированными  $\sim 20$  % зерен.

В зависимости от ориентации зерна относительно направления распространения УВ, наблюдается чаще две и реже одна система двойников. Так независимо от числа импульсов нагружения в зоне 1 в  $18 \pm 2\%$  зерен деформационное двойникование формируется только в одной системе.

Из рисунка 11 видно, что с увеличением числа импульсов нагружения в зоне 1 (вне прифронтного пика  $h \sim 0.1 \dots 0.5$  мм) растет среднее число двойников в зерне по линейному закону вплоть до 5 импульсов нагружения, далее с ростом числа импульсов до 6 число деформационных двойников остается практически неизменным. Подобный линейный рост деформационных двойников с ростом числа импульсов нагружения характерен и для зоны 2.

Согласно данным ПЭМ-анализа проведенных в [34], вследствие пластической деформации происходит измельчение структуры за счет деформационного двойникования и формирования мало- и высокоугловых границ. На светлопольных изображениях в большинстве зерен наблюдали контраст, свойственный материалам, подвергнутым деформационному двойникованию в одной или в нескольких системах одновременно, что согласуется с данными ОМ (рисунок 9). Согласно данным темнопольного анализа в таких зернах образуются двойники деформации со средней шириной пластин  $\sim 40$  нм, собранные в пакеты шириной 100 – 300 нм. При этом минимальное расстояние между двойниковыми границами, т.е. величина, которая определяет длину свободного пробега дислокаций и, следовательно, упрочнение, с увеличением числа импульсов обработки (от 1 до 6) уменьшается с 210 до 120 нм.

В тыльном объеме мишени (зона 3) деформационные двойники начинают формироваться только после 5 импульсов нагружения. При этом деформация двойникованием становится неоднородной: двойникование наблюдается только в зернах с благоприятной ориентацией по отношению к нагрузке (рисунок 9 е). Следствием неоднородного характера деформации зерен является заметный разброс значений микротвердости в соседних

точках (рисунок 8 д). При этом активность двойникования по всему поперечному сечению не зависит от размера зерна, что согласуется с [35]. В ряде зерен двойники второй системы закачиваются внутри зерна, а не пересекают его полностью.

Особо необходимо отметить, что не зависимо от числа импульсов нагружения (1...6) тыльного откола или формирования микропор в данном объеме (зона 3) не выявлено.

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

### **4.1 Предпроектный анализ**

В настоящее время, вместе с развитием науки, бурно развиваются все отрасли промышленности. Всегда шла конкуренция между новыми технологиями и разработками, которые вытесняли с рынка устаревшую продукцию. Вытеснение старой технологии новой происходит тем быстрее, чем больше её надёжность и экономическая эффективность.

Всё, что нас окружает, создано из различных материалов, различающихся по своему строению, свойствам и ценой. Однако большинство из нас хочет иметь самое лучшее, что сможет себе позволить по доступной цене. Исключением не являются самые крупные и состоятельные компании мира, в том числе и промышленные предприятия. Ведь одним из самых главных секретов увеличения дохода является снижение затрат.

#### **4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

Данное исследование посвящено изучению особенности тыльного упрочнения мишени из стали 304L под воздействием мегавольтового электронного луча. Мощный электронный пучок формирует ударную волну в облучаемом материале. Ударная волна такой мощности может быть образована при соударении двух объектов, обладающих определённой массой, с высокой скоростью. Данное исследование позволит определить силу удара, при которой происходит максимальное упрочнение материала без нарушения его сплошности. Результаты исследования целесообразно применить в кузнечно-штамповочном производстве для повышения прочностных характеристик, выпускаемых изделий.

Сталь 304L является наиболее универсальной и наиболее широко используемой из всех марок нержавеющей стали. Её химический состав, механические свойства, свариваемость и сопротивление коррозии/окислению обеспечивает лучший выбор в большинстве приложений за относительно низкую цену. 304 L используется во всех промышленных, коммерческих и внутренних областях из-за ее хорошей антикоррозийной и температурной устойчивости. Вот некоторые ее применения:

- Резервуары(танки) и контейнеры для большого разнообразия жидкостей и сухих веществ;
- Промышленное оборудование в горнодобывающей, химической, криогенной, пищевой, молочной и фармацевтических отраслях промышленности;
- Автомобилестроение и авиастроение.

В зависимости от области применения данной стали, от неё требуются определённые прочностные характеристики, которые получают с помощью различных упрочняющих технологий.

Итак, целевой рынок результатов исследования будет включать в себя все отрасли промышленности, нуждающиеся в высокой износостойкости и прочности изделий.

#### **4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

В то время как происходило освоение кузнечно-штамповочных технологий, большой удельный объём изготавливаемых металлических изделий для всех видов промышленности приходился на литьё и обработку резанием. Штамповка по сравнению с обработкой резанием обеспечивает более высокую производительность, рациональное расходование металла и способствует улучшению его механических характеристик, повышению надёжности и долговечности деталей при эксплуатации. В отдельных

случаях штампованные изделия подвергаются финишной обработке резанием. Применение высокоскоростных методов штамповки позволяет получать детали с необходимой степенью точности[36].

Результаты исследования позволят подбирать оптимальные режимы для высокоскоростных штамповочных прессов, развивающих усилие, обеспечивающее распространение ударной волны в материале, как при облучении сильноточным электронным наносекундным релятивистским пучком большой мощности, что приводит к высокой степени упрочнения материала без нарушения его сплошности.

На сегодняшний день у штамповочного производства конкурентов с точки зрения ресурсоэффективности и ресурсосбережения нет.

#### **4.1.3 FAST – анализ**

FAST – анализ состоит из шести стадий:

1. Выбор объекта FAST – анализа;
2. Описание главной, основных и вспомогательных функций, выполняемых объектом;
3. Определение значимости выполняемых функций объектом;
4. Анализ стоимости функций выполняемых объектом исследования;
5. Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ;
6. Оптимизация функций выполняемых объектом.

Стадия 1. Выбор объекта FAST – анализа.

Объектом данного анализа является объект исследования, а именно сталь аустенитного класса 304L.

Стадия 2. Описание главной, основных и вспомогательных функций, выполняемых объектом.

Главной функцией (назначением) стали 304L является надёжность и долговечность в условиях различного вида нагружения, агрессивных сред в интервале от криогенных до высоких температур. Иными словами главной функцией являются жаропрочность и жаростойкость. Эти свойства стали обеспечивают входящие в её состав легирующие элементы: углерод, хром, никель, марганец и другие.

В качестве основных функций данной нержавеющей стали можно выделить хорошую обрабатываемость давлением, резанием, а также свариваемость.

К вспомогательным функциям можно отнести полное отсутствие магнитных свойств, что благоприятно сказывается при проведении сварочных работ – отсутствует магнитное дутьё, которое влияет отрицательно на геометрию сварного шва.

Стадия 3. Определение значимости выполняемых функций объектом.

Для оценки значимости функций будем использовать метод расстановки приоритетов, предложенный Блумбергом В.А. и Глущенко В.Ф. В основу данного метода положено расчетно-экспертное определение значимости каждой функции.

Для начала необходимо построить матрицу смежности функций, в которой определим более значимые из них.

Таблица 5 – Матрица смежности функций стали 304L

	Жаропрочность/жаростойкость	Механическая обработка	Свариваемость	Диамагнетизм
Жаропрочность/жаростойкость	=	=	>	>
Механическая обработка	=	=	>	>
Свариваемость	<	<	=	>
Диамагнетизм	<	<	<	=

*Примечание:* «<» – менее значимая; «=» – одинаковые функции по значимости; «>» – более значимая.

После определения более значимых функций нужно определить количественное соотношение функции. Для этого построим матрицу количественных соотношений функций.

Таблица 6 - Матрица количественных соотношений функций

	Жаропрочность/жаростойкость	Механическая обработка	Свариваемость	Диамagnetизм	ИТОГО
Жаропрочность/жаростойкость	1	1	1,5	1,5	5
Механическая обработка	1	1	1,5	1,5	5
Свариваемость	0,5	0,5	1	1,5	3,5
Диамagnetизм	0,5	0,5	0,5	1	2,5
<i>Примечание: 0,5 при «&lt;»; 1,5 при «&gt;»; 1 при «=»</i>					$\Sigma=16$

Согласно матрице количественных соотношений получили следующие относительные значимости функций: жаропрочность/жаростойкость и механическая обработка – 0,3125 (5/16), свариваемость – 0,21875, диамagnetизм – 0,15625. Видно, что самыми значимыми функциями (свойствами) для аустенитной стали 304L являются её главные свойства жаропрочность и жаростойкость, а также основные функции – хорошая обрабатываемость давлением и резанием (механическая обработка).

Стадии 4 и 5 – анализ стоимости функций выполняемых объектом исследования и построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ соответственно можно опустить, поскольку свойства рассматриваемой стали зависят от входящих в неё легирующих элементов и не представляется возможным оценить степень влияние каждого элемента на то или иное свойство (функцию), поскольку данное сочетание свойств определяется совокупностью легирующих элементов.

Стадия 6. Оптимизация функций выполняемых объектом.

Сталь 304L обладает рядом свойств и характеристик, которые успешно применяются при производстве конструкций для работы в условиях, в которых данная сталь зарекомендовала себя лучше остальных. С помощью механической обработки давлением, предоставляется возможным улучшить прочностные характеристики рассматриваемой нержавеющей стали, что несомненно расширит область её применения и оправдает дополнительные экономические затраты.

#### **4.1.4 SWOT – анализ**

В этом разделе необходимо выявить сильные и слабые стороны научного проекта, а также возможности и угрозы для его дальнейшей реализации.

Сильные стороны проекта.

Во-первых, научное исследование является фундаментальным, на сегодняшний день, согласно обзору литературных источников, мало работ, занимающихся исследованием влияния сильнофокусированных электронных пучков большой мощности на степень упрочнения металлических материалов. Ранее опыты проводились только для некоторых металлов (железо, медь, алюминий, никель), в последнее время изучается влияние СЭП на стальные сплавы.

Во-вторых, работа выполнялась при финансовой поддержке государственного задания Министерства образования и науки РФ на проведение научно-исследовательских работ ТПУ № 862. Это говорит о некой заинтересованности государства в развитии данного направления науки. В третьих, результаты исследования могут быть применены в оборонной промышленности, в которых встречается ударно-волновое нагружение.

Слабые стороны проекта.

Испытания проводились на электронном ускорителе «СИНУС – 7», данная установка находится в институте сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук. В настоящий момент доступа к этой установке нет, а испытания на ней очень дорогостоящие, и такие расходы государственное финансирование не покрывает. То есть возможности проводить дальнейшие исследования, на сегодняшний день, нет. Исследование проводилось в ИШНКБ ТПУ, но отсутствие растрового электронного микроскопа и просвечивающего электронного микроскопа увеличивало временные и материальные затраты.

Возможен вариант заключения договора или соглашения между Томским политехническим университетом и СО РАН о взаимопомощи для проведения данных исследований, тем более что ТПУ и СО РАН не первый год сотрудничают. В ИШНКБ при университете присутствует лаборатория металлографии сварных соединений, которая слабо оснащена исследовательской аппаратурой. Приобретение РЭМ и ПЭМ позволит сократить временные и материальные затраты исследования, а также возможно извлечение прибыли путём заключения хозяйственных договоров и выполнения их с помощью данного оборудования.

Результаты данного исследования будут широко применяться в производстве, и если возобновиться исследовательская работа в этом направлении, то это приведёт к несомненному развитию.

Одна из реальных угроз проекту – это его закрытие в связи с требующимися большими материальными затратами, которые не покрываются государственным финансированием. Ещё одной возможной угрозой является выход из строя установки, например, поломка труднодоступных и дорогостоящих элементов.

Конкуренты используют сильноточные лазеры большой мощности для проведения исследований по упрочнению металлических материалов. Однако источники лазера очень дорогостоящие и сам лазер вызывает

ударную волну в материале в несколько раз меньше, чем электронный луч, поскольку электроны имеют большую длину пробега, чем лазер и диаметр СЭП больше. Поэтому использование СЭП приводит к большей степени упрочнения материала.

С уверенностью можно сказать, что все сильные стороны проекта оказывают очень сильное влияние на возможность его успешного завершения и последующего внедрения в производство. А именно такие сильные стороны как: фундаментальность исследования, финансовая поддержка, практическое внедрение результатов исследования в производство.

Таблица 7 – SWOT – анализ

	<b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b>	<b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b>
	<p>С1. Финансирование из государственного бюджета.</p> <p>С2. Фундаментальность исследования.</p> <p>С3. Возможность практического внедрения результатов исследования в высокопроизводительное штамповочное производство</p> <p>С4. Отсутствие конкурентов по способности к высокой степени поверхностного и объёмного упрочнения</p>	<p>Сл1. Недоступность к испытательной установке – электронному ускорителю «СИНУС 7».</p> <p>Сл2. Дорогостоящее использование электронного ускорителя. Дефицит этих установок в России и отсутствие их за рубежом.</p> <p>Сл3. Отсутствие РЭМ и ПЭМ на кафедре, проводящей исследование, что увеличивает временные и материальные затраты исследования</p>
<p><b>Возможности:</b></p> <p>В1. Заключение соглашения между НИ ТПУ и СО РАН о взаимной помощи в этом исследовании.</p> <p>В1. Приобретение дополнительного оборудования в ИШНКБ ТПУ: РЭМ и ПЭМ, которое может приносить прибыль.</p>	<p>Поддержка со стороны СО РАН очень сильно скажется на продвижении исследования и ускорит темпы внедрения результатов исследования в производство</p>	<p>Помощь СО РАН может выразиться в уменьшении стоимости пользования установкой до той величины, которую сможет финансировать государственный бюджет для данного исследования</p>

Продолжение таблицы 7

<p>Угрозы:          У1. Закрытие проекта в связи с нехваткой финансов и материальной базы (специального оборудования) для проведения исследования .          У2. Выход из строя труднодоступных и дорогостоящих элементов оборудования.</p>	<p>Государство заинтересовано в развитии науки и в последние годы стало всё больше средств вкладывать в финансирование научной деятельности. Чем быстрее результаты исследования будут внедрены в производство, тем быстрее исчезнут факторы, угрожающие развитию исследования. В дальнейшем возможна заинтересованность производственной стороны в финансировании проекта и его развития.</p>	<p>На данный момент слабые стороны связаны с выходом из строя дорогостоящих элементов оборудования, нехваткой финансов для проведения исследования.</p>
---	--	---

#### 4.1.5 Оценка готовности проекта к коммерциализации

В данном разделе проводится оценка текущего исследования и степень его готовности к коммерциализации, а также определение уровня собственных знаний для его проведения. Специальная форма, содержащая показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта показана в таблице 8.

Таблица 8 – 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	4
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	3	4
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	5	4

Продолжение таблицы 8

4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	3
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	5	4
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	3	4
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	2	3
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	4	4
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	4	3
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	3	4
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	2
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	4	4
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной Разработки	4	3
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	4	4
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	5	4
	<b>ИТОГО БАЛЛОВ</b>	55	54

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i \quad (1)$$

где  $B_{\text{сум}}$  – суммарное количество баллов по каждому направлению;

$B_i$  – балл по  $i$ -му показателю.

Значение  $B_{\text{сум}}$  позволяет говорить о мере готовности научной разработки и ее разработчика к коммерциализации. Так, если значение  $B_{\text{сум}}$  получилось от 59 до 45 – то перспективность выше среднего.

Для успешной коммерциализации текущей разработки необходимы небольшие объемы инвестиции в области маркетинговых исследований, детальная проработка вопросов международного сотрудничества с привлечением специалистов из данной отрасли в команду проекта и повышение уровня компетенций разработчика в области маркетинговых исследований рынков сбыта. По результатам оценки готовности научного проекта к коммерциализации его перспективность выше среднего.

#### **4.1.6 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования**

Задача данного раздела магистерской диссертации – это выбор метода коммерциализации объекта исследования и обоснование его целесообразности.

Методом коммерциализации результатов научно-технического исследования является – передача интеллектуальной собственности в уставной капитал предприятия.

Заинтересованными лицами в полученных данных будут являться сотрудники ИШНКБ ТПУ. Исследование особенностей тыльного упрочнения мишеней из стали 304L под воздействием мегавольтного электронного луча, способного упрочнить данную сталь, позволит проводить исследования в области упрочнения материалов мегавольтным электронным пучком. с возможностью их дальнейшей реализации на машиностроительных предприятиях.

#### **4.2 Инициация проекта**

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы.

Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в Уставе проекта[37].

Устав проекта документирует бизнес-потребности, текущее понимание потребностей заказчика проекта, а также новый продукт, услугу или результат, который планируется создать[37].

Устав научного проекта магистерской диссертации имеет структуру, представленную ниже[37].

1) Цели и результат проекта. Информация по заинтересованным сторонам проекта представлена в таблице 9.

Таблица 9– Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Оборонная промышленность	Исследование позволит получить данные, которые помогут провести углубленный анализ изменения свойств стали 304L под воздействием мегавольтного электронного луча.
Штамповочное производство	

В таблице 10 представлена информация о иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Таблица 10 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	Исследование особенностей тыльного упрочнения мишени из стали 304L под воздействием мегавольтного электронного луча.
Ожидаемые результаты проекта:	Получение экспериментальных результатов упрочнения мишени из стали 304L под воздействием мегавольтного электронного луча.
Критерии приемки результата проекта:	Под действием бегущей УВ сжатия происходит объемное упрочнение материала
	Отсутствие тыльного откола и микропор мишени
Требования к результату проекта:	Требование:
	Выполнение поставленных задач
	Научное объяснение результатов экспериментов
	Заключение о результатах исследования

2) Организационная структура проекта. Информация об участниках проекта представлена в табличной форме (таблица 11).

Таблица 11 – Рабочая группа проекта

п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции
1	Гнюсов С.Ф., д.т.н., профессор ИШНКБ ТПУ	Руководитель	Отвечает за реализацию, координирует деятельность участников проекта
2	Мирошников Е.В., магистрант ИШНКБ ТПУ	Исполнитель	Выполнение экспериментальной части

3) Ограничения и допущения проекта. 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.

Таблица 12 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
3.1. Бюджет проекта	
3.1.1.Источник финансирования	Финансовой поддержке государственного задания Министерства образования и науки РФ на проведение научно-исследовательских работ ТПУ № 862
3.2. Сроки проекта:	
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	—
3.2.2. Дата завершения проекта	30.05.2019 г.
3.3. Прочие ограничения и допущения	Ограничения по использованию установки «СИНУС – 7»

## 4.3 Планирование управления проектом

### 4.3.1 Структура работ в рамках научного исследования

Научное исследование будет состоять из четырех основных этапов, таких как: разработка технического задания и календарного плана, теоретическая подготовка, экспериментальные исследования и обобщение и оценка результатов по данной теме. Каждый этап содержит перечень важных работ, которые необходимо выполнить. В зависимости от вида работ будет свой исполнитель.

Таблица 13 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Выбор темы, постановка цели и задач ВКР	Научный руководитель
	2	Составление предварительного плана ВКР	Научный руководитель
Теоретическая подготовка	3	Подбор и первоначальное ознакомление с литературой по теме ВКР	Инженер
	4	Изучение и выбор метода исследований в ВКР	Инженер
	5	Написание теоретической части ВКР	Инженер
	6	Подбор оборудования и заготовок для проведения процесса	Научный руководитель
Экспериментальные исследования	7	Наплавление металла на заготовки	Инженер
	8	Получение результатов исследования	Инженер
	9	Создание базы данных исследования	Инженер
	10	Анализ базы исследования/полученных результатов	Научный руководитель, Инженер
Обобщение и оценка результатов	11	Оформление итогового варианта ВКР	Инженер
	12	Согласование и проверка работы с научным руководителем	Научный руководитель, Инженер

Таким образом, выделили основные этапы работ и их содержание, а также исполнителей, выполняющие данные работы.

#### 4.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Для определения ожидаемого значения трудоемкости используем формулу:

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

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

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

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

После того, как рассчитали  $t_{\text{ож}i}$ , рассчитывается продолжительность каждой работы в рабочих днях:  $T_{pi} = \frac{t_{\text{ож}i}}{\text{Ч}_i}$ , (3)

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

$t_{\text{ож}i}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$\text{Ч}_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Составление предварительного плана ВКР:

$t_{\text{max}i} = 3$  дней;  $t_{\text{min}i} = 1$  дня.

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{min}i} + 2t_{\text{max}i}}{5} = (3+6)/5 = 1,4 \text{ дня};$$

$$T_{Pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i} = 1,4/1 = 1,4 \approx 2 \text{ дня}$$

Подбор и первоначальное ознакомление с литературой по теме ВКР:

$$t_{\max i} = 14 \text{ дней}; t_{\min} = 7 \text{ дней.}$$

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5} = (21+28)/5 = 9,8 \text{ дней.}$$

$$T_{Pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i} = 9,8/2 = 4,9 \approx 5 \text{ дней.}$$

Изучение и выбор метода исследований в ВКР:

$$t_{\max i} = 14 \text{ дней}; t_{\min} = 10 \text{ дней.}$$

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5} = (30+28)/5 = 11,6 \text{ дней.}$$

$$T_{Pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i} = 11,6/2 = 5,8 \approx 6 \text{ дней}$$

Написание теоретической части ВКР:

$$t_{\max i} = 21 \text{ дня}; t_{\min} = 14 \text{ дней.}$$

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5} = (42+42)/5 = 16,8 \text{ дней.}$$

$$T_{Pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i} = 16,8/1 = 16,8 \approx 17 \text{ дней}$$

Подбор оборудования и заготовок для проведения эксперимента

$$t_{\max i} = 12 \text{ дней}; t_{\min} = 7 \text{ дней.}$$

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5} = (21+24)/5 = 9 \text{ дней.}$$

$$T_{Pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i} = 9/2 = 4,5 \approx 5 \text{ дней}$$

Получение результатов исследования и создание базы данных исследования

$$t_{\max i} = 14 \text{ дней}; t_{\min} = 7 \text{ дней.}$$

$$t_{\text{ожі}} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5} = (21+28)/5 = 9,8 \text{ дней.}$$

$$T_{p_i} = \frac{t_{\text{ожі}}}{\Psi_i} = 9,8/1 = 9,8 \approx 10 \text{ дней}$$

Анализ базы исследования/полученных результатов

$$t_{\max i} = 21 \text{ дней}; t_{\min} = 7 \text{ дней.}$$

$$t_{\text{ожі}} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5} = (21+42)/5 = 29,4 \text{ дней.}$$

$$T_{p_i} = \frac{t_{\text{ожі}}}{\Psi_i} = 29,4/2 = 14,7 \approx 15 \text{ дней}$$

#### 4.3.3 Разработка графика проведения научного исследования

Для разработки графика проведения научного исследования будет использована диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

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

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (4)$$

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

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

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

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} \quad (5)$$

где  $T_{кал} = 365$  – количество календарных дней в году;

$T_{вых} = 104$  – количество выходных дней в году;

$T_{пр} = 14$  – количество праздничных дней в году.

$$k_{кал} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48.$$

Все рассчитанные значения вносим в таблицу 14, после заполнения таблицы 14 строим календарный план-график (таблица 8).

График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. При этом работы на графике выделим различной штриховкой в зависимости от исполнителей.

Таблица 14 – Временные показатели проведения научного исследования

Название Работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$		Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$	
	$t_{min}$ , чел-дни		$t_{max}$ , чел-дни		$t_{ожг}$ , чел-дни					
	Научный руководи тель	Инж	Научный руководи тель	Инж	Научный руководи тель	Инж	Научный руководи тель	Инж	Научный руководи тель	Инж
Выбор темы, постановка цели и задач ВКР	3	-	5	-	3,8	-	4	-	6	-
Составление предварительного плана ВКР	1		3		1,4	-	2	-	2	-
Подбор и первоначальное ознакомление с литературой по теме ВКР	7	7	14	14	9,8	9,8	5	5	4	12
Изучение и выбор метода исследований в ВКР	10	10	14	14	11,6	11,6	6	6	2	21
Написание теоретической части ВКР	-	14	-	21		16,8	-	17	-	17
Подбор оборудования и заготовок для проведения эксперимента	7	7	12	12	9	9	5	5	5	5
Проведение эксперимента	7	7	12	12	9	9	-	10	-	10
Получение результатов исследования	-	7	-	14	-	9,8	-	10	-	10
Создание базы данных исследования	-	7	-	14	-	9,8	-	10	-	10,5
Анализ базы исследования/полученных результатов	7	7	21	21	29,8	29,8	5	25	10	35
Оформление итогового варианта ВКР	-	10	-	21		14,4	-	14	-	21
Согласование и проверка работы с научным руководителем	2	2	4	4	2,8	2,8	1	1	1,5	1,5

Таблица 15– Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№ работ	Вид работ	Исполнители	T <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	Выбор темы, постановка цели и задач ВКР	Научный руководитель	6		▨																
2	Составление предварительного плана ВКР	Научный руководитель	2			▨															
3	Подбор и первоначальное ознакомление с литературой по теме ВКР	Научный руководитель, Инженер	4 12			▨															
4	Изучение и выбор метода исследований в ВКР	Научный руководитель, Инженер	2 21				▨														
5	Написание теоретической части ВКР	Инженер	17																		
6	Подбор оборудования и заготовок для проведения эксперимента	Научный руководитель, Инженер	5 5																		
7	Проведение эксперимента	Инженер	10																		
8	Получение результатов исследования	Инженер	10																		
9	Создание базы данных исследования	Инженер	10,5																		
10	Анализ базы исследования/полученных результатов	Научный руководитель, Инженер	10 35																		
11	Оформление итогового варианта ВКР	Инженер	21																		
12	Согласование и проверка работы с научным руководителем	Научный руководитель, Инженер	1,5																		

Инженер - ██████████ Научный руководитель - ▨

#### 4.3.4 Бюджет научного исследования. Затраты на материалы и эксперименты

Затраты на проведение научного исследования приведены в таблице 16 [38]. Большие затраты потребовались для проведения испытаний на электронном ускорителе, также не дешево обошлись услуги растровой электронной микроскопии, которая необходима была для проведения исследования.

Таблица 16– Затраты на сырье на проведение НИР

Наименование	Затраты, руб.	Примечание
Материалы	1000	В качестве материалов были использованы образцы 20x20 толщиной 9.3 мм из стали 304L.
Установка «СИНУС -7»	60000	Приведена стоимость пользования установкой в течение одного рабочего дня. Эксперименты на ней проводились один день.
Алмазные пасты	1500	
Анализ РЭМ	10000	
Итого	72500	

#### 4.3.5 Расчет фонда заработной платы

Заработная плата определяется в соответствии с количеством отработанного времени по теме и установленным штатно-должностным окладом [39].

Для техника (дипломника) месячный оклад составляет  $Z_{\text{ст}}=6595$  руб/мес, для руководителя (профессора с ПКГ ППС 4) -  $Z_{\text{бп}}=33162$  руб/мес.

Заработная плата рассчитывается по формуле 6[39]:

$$C_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (6)$$

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

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

Основная заработная плата ( $Z_{\text{осн}}$ ) руководителя (лаборанта, инженера) рассчитывается по следующей формуле 7[39]:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}}, \quad (7)$$

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

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

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

Среднедневную заработную плату можно рассчитать по формуле 8, [39]:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}}}{T}, \quad (8)$$

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

$T$  – количество рабочих дней в месяце. Принимаем 6- дневную рабочую систему, значит  $T=26$  дней.

Месячный должностной оклад работника [39]:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{б}} \cdot k_{\text{р}}, \quad (9)$$

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

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

Теперь рассчитываем месячную заработную плату работников проекта:

$$Z_{\text{мт}} = 6595 \cdot 1.3 = 8573.5 \text{ руб.};$$

$$Z_{\text{мп}} = 33162 \cdot 1.3 = 43110.6 \text{ руб.}$$

Определяем среднедневную заработную плату:

$$Z_{\text{дн.т}} = \frac{8573.5}{26} = 329.75 \text{ руб.};$$

$$Z_{\text{дн.п}} = \frac{43110.6}{26} = 1658.1 \text{ руб.}$$

Основную заработную плату определим с допущением, что на данный проект его работники затратили 100 полных рабочих дней (8 часов в день):

$$З_{\text{осн.г}}=329.75 \cdot 100=32975 \text{ руб.};$$

$$З_{\text{осн.п}}=1658.1 \cdot 100=165810 \text{ руб.}$$

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10–15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы [39]:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}} , \quad (10)$$

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

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

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

Принимаем коэффициент дополнительно зарплаты равным 0,1 и получаем:

$$З_{\text{доп.г}} = 0.1 \cdot 32975 = 3297.5 \text{ руб.};$$

$$З_{\text{доп.п}} = 0.1 \cdot 165810 = 16581 \text{ руб.};$$

Итак, определяем полную зарплату работников:

$$С_{\text{зпт}}=32957+3297.5=36254.5 \text{ руб.};$$

$$С_{\text{зпт}}=165810+16581=182391 \text{ руб.}$$

Также необходимо рассчитать отчисления во внебюджетные фонды (социальные нужды) по формуле 11[39]:

$$С_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) , \quad (11)$$

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

Принимаем  $k_{\text{внеб}}=0.302$ .

$$С_{\text{внеб.г}}=0.302 \cdot 36254.5=10948.859 \text{ руб.};$$

$$С_{\text{внеб.п}}=0.302 \cdot 182391=55082.082 \text{ руб.}$$

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

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле 12 [39]:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (12)$$

где  $k_{\text{накл}}$  – коэффициент накладных расходов. Принимаем  $k_{\text{накл}}=0.8$ .

$$C_{\text{накл.г}}=0.8 \cdot 218645.5=174916.4 \text{ руб.};$$

Результаты расчета фонда заработной платы представлены в таблице 17.

Таблица 17– Фонд заработной платы

Исполнитель	Число исполнителей	Трудоёмкость выполнения работы Тисл, д	Зарботная плата по тарифной ставке руб./мес.	Среднедневная зарботная плата, руб	Основная зарботная плата исполнителя ЗПосн, руб.	Месячный должностной оклад, руб
Дипломник (техник)	1	100	6595	329.75	32975	8573.5
Руководитель (профессор )	1	100	33162	1658.1	165810	43110.6
Итого:	2	200			198785	

Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта.

Таблица 18 - Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1.Материальные затраты НТИ	72500
2.Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	198785
3.Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	19878,5

Продолжение таблицы 18

4. Отчисления на социальные нужды	36508,6
5. Накладные расходы	174916,4
6. Бюджет затрат НИИ	502588,5

Бюджет научного исследования, который включает материальные затраты, затраты по основной и дополнительной заработной плате, отчисления во внебюджетные фонды и накладные расходы и составил 502588,5 руб.

#### **4.4 Определение ресурсной финансовой и бюджетной эффективности исследования**

##### **4.4.1 Оценка сравнительной эффективности проекта**

Данное исследование является очень сложным с точки зрения получения достоверных результатов, которые можно обрабатывать в дальнейшем. Дело в том, что сформировать ударную волну в материале с требуемыми параметрами не так уж и просто, как это может казаться на первый взгляд. Но благодаря концентрированным источникам энергии удаётся это сделать. Однако подобные эксперименты можно провести с помощью энергии взрыва, которая метает одну пластину на другую неподвижную и при соударении во второй образуется ударная волна. Но малейшие отклонения опыта (угол наклона пластины, мощность взрыва и др.) влияют на результаты и их достоверность, поэтому могут потребоваться дополнительные временные и финансовые затраты.

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин:

финансовой эффективности и ресурсоэффективности. В нашем исследовании мы можем рассчитать интегральный показатель ресурсоэффективности.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом [37]:

$$I_m = \sum_{i=1}^n a_i b_i, \quad (13)$$

где  $I_m$  – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го параметра;

$b_i$  – бальная оценка  $i$ -го параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы, которая приведена ниже. В текущем исследовании применялся сильноточный электронный пучок. В качестве аналогов рассмотрим сильноточный лазер (аналог 1) и энергию взрыва (аналог 2).

Таблица 19– Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Сложность точной постановки эксперимента	0.4	5	5	2
2. Удобство в эксплуатации	0.1	5	5	2
3. Энергосбережение	0.15	3	2	1
4. Безопасность	0.15	3	3	2
5. Стоимость эксперимента	0.2	4	3	2
ИТОГО	1			

По формуле 13 и данным таблицы 19 рассчитаем интегральный показатель ресурсоэффективности.

$$I_m^p = 0.4 \cdot 5 + 0.1 \cdot 5 + 0.15 \cdot 3 + 0.15 \cdot 3 + 0.2 \cdot 4 = 4.2;$$

$$I_m^{a1} = 0.4 \cdot 5 + 0.1 \cdot 5 + 0.15 \cdot 2 + 0.15 \cdot 3 + 0.2 \cdot 3 = 3.85;$$

$$I_m^{a2} = 0.4 \cdot 2 + 0.1 \cdot 2 + 0.15 \cdot 1 + 0.15 \cdot 2 + 0.2 \cdot 2 = 1.85.$$

где  $I_m^p$  – интегральный показатель текущего проекта,  $I_m^{a1}$  – интегральный показатель сильноточного лазера (аналог 1),  $I_m^{a2}$  – интегральный показатель инергии взрыва (аналог 2).

Из расчётов наглядно видна ресурсоэффективность установки, на которой были проведены эксперименты настоящего исследования.

Из таблицы видно, что для текущего исследования коэффициенты энергосбережения и стоимости эксперимента выше, чем у аналогов. Из этого можно сделать вывод, что интегральный финансовый показатель будет меньше, чем у аналогов исследования. А значит, на данное исследование был израсходован бюджет, величина которого могла быть гораздо больше при проведении исследований с помощью аналогов.

## **Вывод**

В ходе выполнения данного раздела выпускной квалификационной работы был проведен технико-экономический анализ исследования особенности тыльного упрочнения мишени из стали 304L под воздействием мегавольтного электронного луча. Целевой рынок результатов исследования будет включать в себя все отрасли промышленности, нуждающиеся в высокой износостойчивости и прочности изделий.

Результаты исследования могут найти практическое применение на объектах оборонной промышленности и тяжелого машиностроения.

Построена интерактивная матрица SWOT-анализа, в которой показаны слабые (недоступность к испытательной установке – электронному ускорителю «СИНУС–7», дорогостоящее использование электронного ускорителя, отсутствие РЭМ и ПЭМ на кафедре, проводящей исследование) и сильные (финансирование из государственного бюджета, фундаментальность исследования, возможность практического внедрения результатов исследования в оборонную промышленность и т.д.) стороны для разрабатываемого проекта. Одна из реальных угроз проекту – это его закрытие в связи с требующимися большими материальными затратами, которые не покрываются государственным финансированием. Ещё одной возможной угрозой является выход из строя установки, например, поломка труднодоступных и дорогостоящих элементов.

Сделан план исследования, в котором распределялись основные функции проекта между руководителем и дипломником и сделан расчет бюджета научного исследования, в который вошли расходы на материалы и оборудование, а также заработные платы участников проекта.

По оценке ресурсоэффективности проекта, можно сделать выводы, что для текущего исследования коэффициенты энергосбережения и стоимости эксперимента выше, чем у аналогов. Из этого можно сделать вывод, что интегральный финансовый показатель будет меньше, чем у аналогов исследования. А значит, на данное исследование был израсходован бюджет, величина которого могла быть гораздо больше при проведении исследований с помощью аналогов.

Рассчитан бюджет научного исследования, который включает материальные затраты, затраты по основной и дополнительной заработной плате, отчисления во внебюджетные фонды и накладные расходы и составил 502588,5 руб.

## **5 Социальная ответственность**

### **Характеристика объекта исследования**

Все работы производились в офисных помещениях 16а корпуса НИТПУ. В ходе научного исследования ставились эксперименты на электронном ускорителе «СИНУС-7», а основная часть работы была выполнена с использованием ЭВМ, поэтому в данном разделе ВКР рассматриваются вопросы анализа и выявления возможных опасных и вредных факторов на рабочем месте инженера-лаборанта. Площадь занимаемого помещения составляет 40 м<sup>2</sup>, на которых располагаются 6 человек.

При проведении экспериментов в лаборатории 16а корпуса ТПУ, на рабочем месте лаборанта были выявлены опасные и вредные производственные факторы в соответствии с требованиями ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.»[40].

### **5.1 Производственная безопасность**

#### **5.1.1. Анализ выявленных вредных факторов**

Вредным производственным фактором называется такой производственный фактор, воздействие которого на работающего человека в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению трудоспособности. В результате идентификации выявлены следующие вредные производственные факторы:

- электромагнитные поля в производственных помещениях;
- производственный шум;
- освещенность рабочей зоны;
- микроклимат в помещении.

### 5.1.1.1 Электромагнитные поля в производственных помещениях

Основным вредным фактором является электромагнитное поле (ЭПМ). Находясь в электромагнитном поле, человек поглощает его энергию, в тканях возникают высокочастотные токи с образованием теплового эффекта. Биологическое действие электромагнитного излучения зависит от длины волны, напряженности поля, длительности и режима воздействия. При воздействии на человека электромагнитного поля возникают нарушения электрофизиологических процессов в центральной нервной и сердечнососудистой системах. Функций щитовидной железы, генеративной функции организма.

Основными источниками электромагнитного излучения во время разработки проекта были электронный ускоритель, ЭВМ.

Согласно [41], временные допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПЭВМ, составляют:

- напряженность электрического поля в диапазоне частот 5 Гц - 2кГц – 25 В/м;
- напряженность электрического поля в диапазоне частот 2 кГц – 400кГц – 2,5 В/м;
- плотность магнитного потока в диапазоне частот 5 Гц – 2кГц – 250 нТл;
- плотность магнитного потока в диапазоне частот 2 кГц – 400кГц – 25 нТл;
- электростатический потенциал экрана видеомонитора – 500 В.

Основным коллективным средством защиты от воздействия ЭМП является экранирование источника электромагнитного излучения или же объекта защиты. При возможности эффективной защитой является удаление источника излучения из рабочей зоны. В качестве средств индивидуальной защиты, при значительном действии электромагнитного поля, используют одежду, которая изготавливается из металлизированной ткани или другой

ткани с высокой электропроводностью. Ограничение времени пребывания в зоне действия ЭПМ так же является эффективной защитой.

В процессе выполнения научного исследования по упрочнению мишени из аустенитной стали не были превышены нормы СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы" (с изменениями на 21 июня 2016 года)[41].

### **5.1.1.2 Производственный шум**

Шум является общебиологическим раздражителем и в некоторых условиях может оказывать влияние на системы организма человека. Шум на рабочем месте инженера-лаборанта возникает от работы ПК, а также может проникать извне. Длительное воздействие шума большой интенсивности приводит к патологическому состоянию организма, к его утомлению.

Интенсивный шум вызывает изменения сердечно-сосудистой системы, сопровождаемые нарушением тонуса и ритма сердечных сокращений, изменяется артериальное кровяное давление.

Методы установления предельно допустимых шумовых характеристик стационарных машин изложены в межгосударственном стандарте ГОСТ 12.1.003-2014 "Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности"[42].

Для оценки шума используют частотный спектр измеряемого уровня звукового давления, выраженного в дБ, в октавных полосах частот, который сравнивают с предельным спектром, для офисных помещений уровень звукового давления должен не превышать 80 дБА (по СанПиН 3359-16) [43].

Анализ шумовых факторов в помещении инженера-лаборанта соответствует нормам. Дополнительные мерами для защиты от шума извне могут служить современные пластиковые окна и шумоизоляционные панели

стен. Шум от работы ПК можно понизить используя малошумные вентиляторы охлаждения, либо водяное охлаждение системного блока.

### **5.1.1.3 Исследование освещенности рабочей зоны**

Освещение рабочего места – важный фактор создания нормальных условий труда. Согласно СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95 [44], рабочее место инженера должно освещаться как естественным, так искусственным освещением. Естественное освещение попадает в аудитории через большое окно в светлое время суток. Естественное освещение по своему спектральному составу является наиболее приемлемым. Искусственное освещение отличается относительной сложностью восприятия его зрительным органом человека.

Слабая освещенность рабочего места инженера не только уменьшает остроту зрения, но и вызывает утомление организма в целом, что приводит к снижению производительности труда и увеличению опасности заболеваний человека. Поэтому с целью обеспечения требуемых норм освещенности необходимо произвести расчет искусственной освещенности. Для расчета общего равномерного освещения при горизонтальной рабочей поверхности основным является метод светового потока (коэффициента использования), учитывающий световой поток, отраженный от потолка и стен. При работе с персональным компьютером в сочетании с нормативной работой и технической документацией согласно действующим нормам СП 52.13330.2016 [44] для искусственного освещения регламентирована наименьшая допустимая освещенность, а для естественного и совмещенного определены коэффициенты естественной освещенности (КЕО).

Нормативное значение КЕО для третьего пояса светового климата (расположение города Томска) в соответствии с СП 52.13330.2016 [44] при третьем разряде зрительной работы (III г: контраст малый и средний, фон

светлый и средний), при естественном боковом освещении КЕО,  $e_n = 1,2 \%$ , освещенность при искусственном освещении – 200 лк, ослепленность 40 ед. и пульсации искусственного освещения не более 15 %. Рекомендуемая освещенность для работы с экраном дисплея составляет 200 лк, а при работе с экраном в сочетании с работой с документами 400 лк согласно СП 52.13330.2016 [44].

Для анализа освещенности на рабочем месте инженера-лаборанта представленного на рисунке 12, проведем расчет системы искусственного освещения на рабочем месте инженера-лаборанта, пользуясь методом коэффициента использования.

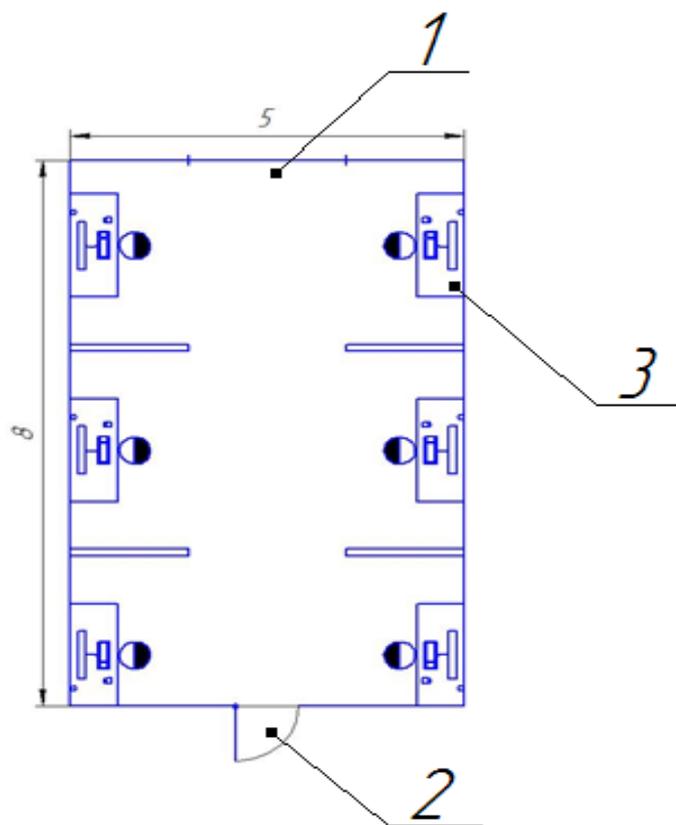


Рисунок 12 – Схема рабочего места, где поз.1 окно, поз.2 дверь, поз.3 рабочее место

Расчетным уравнением метода коэффициента использования светового потока является [45]:

$$F = \frac{E \cdot k \cdot S \cdot z}{\eta}, \quad (14)$$

где  $F$  – расчетный световой поток (лм) всех ламп, которые необходимо установить в светильниках для получения требуемой освещенности в горизонтальной плоскости;

$E$  – минимальная нормируемая освещенность,  $E = 400$  лк;

$k$  – коэффициент запаса,  $k = 1,5$ ;

$S$  – площадь освещаемого помещения,  $40 \text{ м}^2$ ;

$\eta$  – коэффициент использования светового потока (в долях единицы);

$z$  – отношение средней освещенности к минимальной, для люминесцентных ламп принимаем  $z = 1,1$ .

Коэффициент использования светового потока  $\eta$  зависит от типа светильника, коэффициентов отражения светового потока от стен  $\rho_c = 50 \%$ , потолка  $\rho_n = 70 \%$ , а также геометрических размеров помещения и высоты подвеса светильников, что учитывается одной комплексной характеристикой – индексом помещения.

Величина индекса помещения подсчитывается по формуле:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)}, \quad (15)$$

где  $A$  и  $B$  – ширина и длина помещения,  $A = 5 \text{ м}$ ,  $B = 8 \text{ м}$ ;

$h$  – высота подвеса светильника над расчетной поверхностью, равная:

$$h = H - h_p - h_c, \quad (16)$$

где  $H$  – высота помещения, равная  $3,5 \text{ м}$ ;

$h_p$  – высота рабочей поверхности, равная  $0,8 \text{ м}$ ;

$h_c$  – высота подвеса светильника от уровня потолка, равная  $0,2 \text{ м}$ .

$$h = 3,5 - 0,8 - 0,2 = 2,5 \text{ м.}$$

$$i = \frac{5 \cdot 8}{2,5 \cdot (5 + 8)} = 1,23.$$

Определяем коэффициент использования светового потока  $\eta = 0,53$ .

Тогда величина светового потока  $F$  равна:

$$F = \frac{400 \cdot 1,5 \cdot 40 \cdot 1,1}{0,53} = 49811 \text{ лм.}$$

Определим расстояние между рядами светильников, используя соотношение:

$$L = \xi \cdot h, \quad (17)$$

где  $\xi$  – наивыгоднейшее расстояние между светильниками, для типа ОД  $\xi = 1,4$ .

$$L = 1,4 \cdot 2,5 = 3,5 \text{ м.}$$

Расстояние между стенами и крайними рядами принимаем равным  $l = L/3$ ,  $l = 3,5/3 = 1,17$  м. При ширине помещения  $A = 5$  м, получаем число рядов светильников:

$$n = \frac{A}{L} = \frac{5}{3,5} = 1,4 \approx 2. \quad (18)$$

Определим число светильников в одном ряду:

$$N_p = \frac{B - 2l}{l_{св}}, \quad (19)$$

где  $l_{св}$  – длина светильника, для светильника типа ОД–2–40  $l_{св} = 1,23$  м.

$$N_p = \frac{8 - 2 \cdot 1,17}{1,23} = 4,6 \approx 4.$$

Таким образом, общее число светильников  $N$ :

$$N = N_p \cdot n \quad (20)$$

$$N = 4 \cdot 2 = 8.$$

Определим требуемый световой поток одной лампы:

$$F_{л} = \frac{F}{2 \cdot N} \quad (21)$$

$$F_{л} = \frac{49811}{2 \cdot 8} = 3113 \text{ лм.}$$

Выбираем тип лампы устанавливаемой в светильники, нам подходит люминесцентная лампа ЛБ-40 с номинальным световым потоком 3200 лм.

Подсчитаем расчетную освещенность в помещении при выбранных лампах по следующей формуле:

$$E_p = E \cdot \frac{F_{ЛН}}{F_L}, \quad (22)$$

$$E_p = 400 \cdot \frac{3200}{3113} = 411 \text{ лк.}$$

Таким образом, выбранная система освещения обеспечивает требуемую освещенность рабочего места инженера.

Потребляемая мощность осветительной установки составит:

$$P = 16 \cdot 40 = 640 \text{ Вт.}$$

Таким образом, выбранная система освещения обеспечивает требуемую освещенность рабочего места. К дополнительным мерам, можно отнести использование местного освещения на рабочих местах (настольные лампы).

#### **5.1.1.4 Воздушная среда и микроклимат в помещении**

Микроклимат производственных помещений – это климат внутренней среды помещения, который определяется влияющими на человека сочетаниями температуры, влажности и скорости перемещения воздуха, а также температуры окружающих предметов ГОСТ Р 2.2.2006-05. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда [46]. Согласно ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны [47], оптимальные микроклиматические условия создают общее и локальное ощущение теплового комфорта во время восьми часового рабочего дня, не вызывают отклонений в состоянии здоровья и создают условия для высокой производительности труда.

Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны должны отвечать ГОСТ 12.1.005-88 [47]. Оптимальные и допустимые нормы

температуры, относительной влажности и скорости перемещения воздуха приведены в таблице 20[47].

Таблица 20– Оптимальные величины параметров микроклимата на рабочих местах производственных помещений [47]

Период года	Категория работ по уровням энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с, не более
Холодный	Ia (до 139)	22-24	21-25	60-40	0,1
	Iб (140-174)	21-23	20-24	60-40	0,1
	IIa (175-232)	19-21	18-22	60-40	0,2
	IIб (233-290)	17-19	16-20	60-40	0,2
	III (более 290)	16-18	15-19	60-40	0,3
Теплый	Ia (до 139)	23-25	22-26	60-40	0,1
	Iб (140-174)	22-24	21-25	60-40	0,1
	IIa (175-232)	20-22	19-23	60-40	0,2
	IIб (233-290)	19-21	18-22	60-40	0,2
	III (более 290)	18-20	17-21	60-40	0,3

В нашем случае рассматривается рабочий кабинет размерами 8x5 м, как показано на рисунке 12, высота кабинета 3,5 м.

Согласно, установленным размерам рабочего кабинета в нем располагается 6 человек. Объем помещения 140 м<sup>3</sup>, общая площадь 40 м<sup>2</sup>, тогда на одного человека приходится 23,3 м<sup>3</sup> и 6,7 м<sup>2</sup>, соответственно, что удовлетворяет санитарным требованиям помещения.

Объем и площадь производственного помещения, которые должны приходиться на каждого работающего, по санитарным нормам – 20 м<sup>3</sup> и 6,5 м<sup>2</sup>, соответственно. Высота помещения должна быть не менее 3 м [47].

Для категории работ I(б), к которым относится работа лаборанта, характерны такие работы, интенсивность энерго-затрат которых равна 121–150 ккал/ч (140–174 Вт), это работы, производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся некоторыми физическими напряжениями.

Для обеспечения оптимальных и допустимых показателей микроклимата в холодный период года применяется водяное отопление, а в теплый период года для обеспечения защиты от попадания прямых солнечных лучей применяются жалюзи.

Одними из основных мероприятий по оптимизации микроклимата и состава воздуха в производственных помещениях являются обеспечение надлежащего воздухообмена с использованием механической приточно-вытяжную вентиляции, тепловая изоляция нагретых поверхностей оборудования, воздухопроводов и трубопроводов.

Во время исследования упрочнения аустенитной стали в 16а корпусе ТПУ микроклимат отвечал нормам изложенным в таблице 1.

Микроклимат аудиторий поддерживается на необходимом уровне системой водяного центрального отопления, естественной вентиляцией, а также искусственным кондиционированием и дополнительным прогревом в холодное время года.

## **5.1.2 Анализ выявленных опасных факторов**

### **5.1.2.1 Требования электробезопасности**

Все оборудование должно быть выполнено в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты [48].

Комната, в которой выполнялась работа, относится к категории помещений без повышенной опасности, поскольку она характеризуется следующими признаками: температура воздуха и влажность в норме, а также электрооборудование и электрические сети выполнены в соответствии с «Правилами устройства электроустановок» (ПУЭ). Но в процессе деятельности с ЭВМ, работающим от источника тока, может возникнуть опасность поражения электрическим током. Основными причинами этого могут послужить следующие факторы: прикосновение к токоведущим частям или прикосновение к металлическим конструктивным частям, оказавшимся под напряжением. Для предотвращения опасности поражения электрическим током следует соблюдать правила электрической безопасности:

- перед включением ЭВМ в сеть, необходимо визуально проверить ее электрическую часть, на отсутствие возможных видимых нарушений изоляции, а также на отсутствие токопроводящих частей на корпусе компьютера;

- рабочее место инженера с ЭВМ не должно быть размещено вблизи силовых кабелей и высоковольтных трансформаторов;

- ЭВМ подключается через блок питания или питающее устройство, которые имеют сетевой фильтр, конденсаторы которого предназначены для шунтирования через провод зануления, и соответствующие трехполосные вилку и розетку высокочастотных помех питающей сети на землю;

- при выявлении признаков замыкания необходимо немедленно отключить от электрической цепи ЭВМ;

– запрещается подключать корпус ЭВМ к батареям отопления, т.к. при неисправности источника питания ЭВМ батареи могут оказаться под напряжением;

– запрещается при работающей ЭВМ в то же время прикасаться к приборам, имеющим естественное заземление.

К защитным мерам от опасности прикосновения к токоведущим частям электроустановок относятся: изоляция, ограждение, блокировка, малые напряжения, электрозащитные средства.

В корпусе 16а ТПУ используются следующие защитные меры от поражения электрическим током при работе с электроустановками:

–защитное заземление – предназначено для предотвращения «замыкания на корпус» в «замыкание на землю», с тем, чтобы уменьшить напряжение прикосновения и напряжение шага до безопасных величин (выравнивание самый распространенный способ защиты от поражения электрическим током);

– зануление при замыкании на корпус электроустановок – отключение участка электрических цепей;

– системы защитного отключения – отключение электроустановок в случае проявления опасности пробоя на корпус;

– защитное разделение сетей;

– предохранительные устройства.

К работам на электроустановках допускаются лица, старше 18 лет, изучившие инструктаж и обученные безопасным приемам труда. К тому же электробезопасность зависит и от профессиональной подготовки работников, сознательной производственной и трудовой дисциплины. Целесообразно каждому работнику знать меры первой медицинской помощи при поражении электрическим током.

При выполнении мер защиты в электроустановках напряжением до 1 кВ классы применяемого электрооборудования по способу защиты человека от поражения электрическим током по ГОСТ Р 12.1.009-2009 «ССБТ.

Изделия электротехнические. Общие требования безопасности» [49] следует принимать в соответствии с таблицей 21.

В результате проведенного анализа для предотвращения случаев электротравматизма на рабочем месте, рекомендуется применение электрооборудования класс 0. Помимо этого в качестве дополнительной защиты использовать сетевые фильтры, источники бесперебойного питания, использование закрытых розеток.

Таблица 21–Применение электрооборудования в электроустановках напряжением до 1 кВ

Класс по ГОСТ12.2.007.0 РМЭК536	Маркировка	Назначение защиты	Условия применения электрооборудования в электроустановке
Класс 0	-	При косвенном прикосновении	1. Применение в непроводящих помещениях. 2. Питание от вторичной обмотки разделительного трансформатора только одного электроприемника
Класс I	Защитный зажим -знак  или буквы PE, или желто-зеленые полосы	При косвенном прикосновении	Присоединение заземляющего зажима электрооборудования к защитному проводнику электроустановки
Класс II	Знак 	При косвенном прикосновении	Независимо от мер защиты, принятых в электроустановке
Класс III	Знак 	От прямого и косвенного прикосновений	Питание от безопасного разделительного трансформатора

Помещения по электробезопасности подразделяются на 3 группы[50]:

1) Помещение без повышенной опасности (сухое, хорошо отапливаемое, помещение с токонепроводящими полами, с температурой 18 – 20°, с влажностью 40–50%.

2) Помещения с повышенной опасностью (где имеется один из следующих признаков: повышенная температура, влажность 70–80%, токопроводящие полы. Металлическая пыль, наличие заземления. Большого количества оборудования);

3) Помещение с повышенной опасностью (где имеется один из следующих признаков: повышенная температура, влажность 70–80%, токопроводящие полы, металлическая пыль, наличие заземления, большого количества оборудования).

Помещение для инженера относится к 1ой группе электробезопасности, т.к. в наличии электрооборудование (компьютеры, принтеры, шредеры и т.д.). Дополнительные меры безопасности в данном случае не требуются.

При анализе рабочего места инженера в 16а корпусе ТПУ отклонений от требований, изложенных выше, не выявлено.

## **5.2 Экологическая безопасность**

В 16а корпусе в качестве осветительных приборов приняты люминесцентные лампы, должны быть разработаны меры по их утилизации.

Хранение люминесцентных ламп должно осуществляться в помещении, которое отдельно расположено от мастерских и лабораторий корпуса. Оно должно соответствовать требованиям правил хранения токсичных отходов и санитарных норм. В нем должна быть налажена система вентиляции.

Полы в помещении должны быть изготовлены из водонепроницаемого материала, который препятствует попаданию вредного

металла в окружающую среду. На случай аварийной ситуации в помещении для хранения ламп дневного света должно быть не менее 10 литров воды и запас марганцевого калия.

Отработанные люминесцентные светильники должны быть помещены в плотную тару. В роли ее могут выступать картонные коробки, коробки из ДСП, фанеры, бумажные или полиэтиленовые мешки. В одной картонной коробке должно быть не более 30 единиц продукции. Емкости должны быть расставлены на стеллажах, чтобы обезопасить их от любого механического воздействия. На каждой из них должна быть надпись «Отход 1 кл. опасности. Отработанные люминесцентные лампы».

### **5.3 Защита в чрезвычайных ситуациях**

#### **5.3.1 Пожарная безопасность**

Пожары в корпусах ТПУ представляют особую опасность, так как сопряжены с большими материальными потерями. Характерная особенность 16а корпуса ТПУ — небольшие площади помещений. Как известно, пожар может возникнуть при взаимодействии горючих веществ, окислителя и источников зажигания. В помещениях корпуса присутствуют все три основных фактора, необходимые для возникновения пожара [51].

Горючими компонентами помещения 16а корпуса являются: строительные материалы для акустической и эстетической отделки помещений, перегородки, двери, полы, перфокарты и перфоленты, изоляция кабелей.

Источниками зажигания в 16а корпусе могут быть короткое замыкание и перегрев ЭВМ, приборы, применяемые для технического обслуживания, устройства электропитания, кондиционирования воздуха, где в результате различных нарушений образуются перегретые элементы,

электрические искры и дуги, способные вызвать загорания горючих материалов.

В современных ЭВМ очень высокая плотность размещения элементов электронных схем. В непосредственной близости друг от друга располагаются соединительные провода, кабели. При протекании по ним электрического тока выделяется значительное количество теплоты. При этом возможно оплавление изоляции. Для отвода избыточной теплоты от ЭВМ служат системы вентиляции и кондиционирования воздуха. При постоянном действии эти системы представляют собой дополнительную пожарную опасность.

Для нашего помещения установлена категория пожарной опасности В.

Одна из наиболее важных задач пожарной защиты — защита помещений от разрушений и обеспечение их достаточной прочности в условиях воздействия высоких температур при пожаре. Учитывая высокую стоимость электронного оборудования 16а корпуса, а также категорию его пожарной опасности, здания корпуса и части здания другого назначения, в которых предусмотрено размещение ЭВМ, должны быть первой и второй степени огнестойкости. [51] Для изготовления строительных конструкций используются, как правило, кирпич, железобетон, стекло, металл и другие негорючие материалы. Применение дерева должно быть ограничено, а в случае использования необходимо пропитывать его огнезащитными составами [51].

Разработана инструкция с мероприятиями по обеспечению пожарной безопасности. Такая инструкция ПБ должна быть размещена на каждом рабочем месте.

На рабочем месте запрещается иметь горючие вещества

В помещениях запрещается:

- а) зажигать огонь;
- б) включать электрооборудование, если в помещении пахнет газом;
- в) курить;

- г) сушить что-либо на отопительных приборах;
- д) закрывать вентиляционные отверстия в электроаппаратуре

Источниками воспламенения являются:

- а) искра при разряде статического электричества
- б) искры от электрооборудования
- в) искры от удара и трения
- г) открытое пламя

При возникновении пожароопасной ситуации или пожара персонал должен немедленно принять необходимые меры для его ликвидации, одновременно оповестить о пожаре администрацию. Помещения с электрооборудованием должны быть оснащены огнетушителями типа ОУ-2. [51] На стене рядом с местом расположения огнетушителя должна находиться таблица с номерами телефонов экстренного вызова местной и городской пожарной команды.

Помещение инженера-лаборанта соответствует нормам пожарной безопасности. В качестве дополнительных мер по предотвращению пожаров предлагается использовать автоматизированные системы оповещения и пожаротушения.

План эвакуации людей из лаборатории производственного корпуса показан на рисунке 13.

При проведении анализа рабочего места инженера-лаборанта предмет возникновения чрезвычайных ситуаций (ЧС), определены следующие меры защиты персонала.

Производство находится в городе Томске с континентально-циклоническим климатом. Природные явления (землетрясения, наводнения, засухи, ураганы и т. д.), в данном городе отсутствуют. Возможными ЧС на объекте в данном случае, могут быть сильные морозы и диверсия.

Для Сибири в зимнее время года характерны морозы. Достижение критически низких температур приведет к авариям систем теплоснабжения и жизнеобеспечения, приостановке работы, обморожениям и даже жертвам

среди населения. В случае переморозки труб должны быть предусмотрены запасные обогреватели. Их количества и мощности должно хватать для того, чтобы работа на производстве не прекратилась.

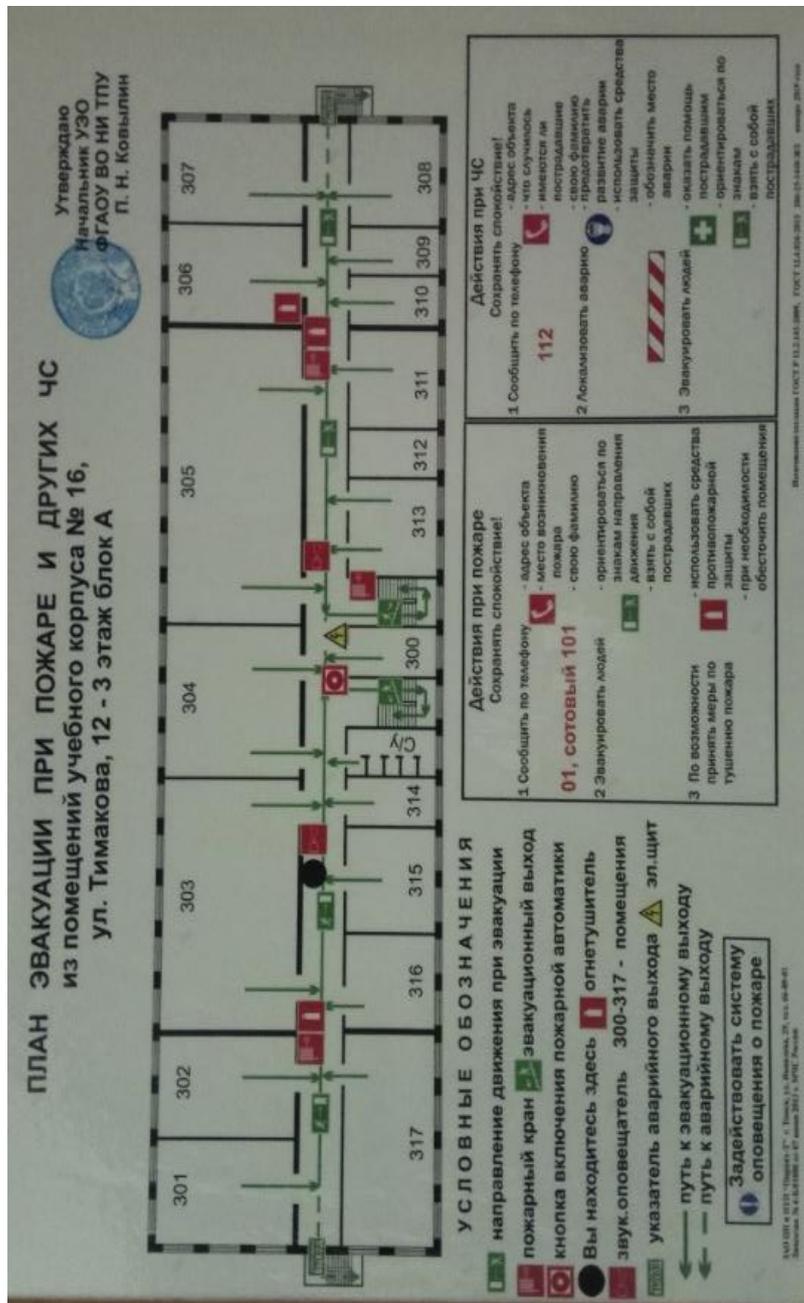


Рисунок 13– План эвакуации при пожаре и других ЧС.

### **5.3.2 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Чрезвычайные ситуации, возникающие в результате диверсий, возникают все чаще. Зачастую такие угрозы оказываются ложными. Но случаются взрывы и в действительности.

Для предупреждения вероятности осуществления диверсии предприятие необходимо оборудовать системой видеонаблюдения, круглосуточной охраной, пропускной системой, надежной системой связи, а также исключения распространения информации о системе охраны объекта, расположении помещений и оборудования в помещениях, системах охраны, сигнализаторах, их местах установки и количестве. Должностные лица раз в полгода проводят тренировки по отработке действий на случай экстренной эвакуации [52].

## **5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности и социальной защиты работников на предприятии**

### **5.4.1 Пособие по временной нетрудоспособности**

В соответствии с Законом «Об обязательном социальном страховании на случай временной нетрудоспособности и в связи с материнством» от 29.12.2006 № 255-ФЗ [53] современные работодатели должны предоставлять своим сотрудникам все льготы и компенсации, которые предусматриваются положениями трудового права, а также иными законодательными актами. Сюда можно отнести и гарантию в предоставлении оплаты временного периода нетрудоспособности.

Пособие по временной нетрудоспособности - денежные выплаты сотруднику, который, в связи с болезнью или другими, установленными законодательством, причинами, утратил свой заработок [53].

Основанием для компенсации в виде пособия является больничный лист. Выплаты производит работодатель по месту работы. Если, сотрудник работает у нескольких работодателей, тогда пособие назначают по каждому месту работы (есть исключения). Гражданам, утратившим трудоспособность в течение 30 дней после увольнения, пособие начисляет последнее место работы или территориальный орган ФСС России.

Случаи предоставления пособия по временной нетрудоспособности [53]:

– застрахованное лицо утратило трудоспособность в связи с заболеванием или травмой;

– у застрахованного лица есть необходимость осуществлять уход за больным членом семьи;

– после стационарного лечения работник продолжает лечение в санаторно-курортных учреждениях, расположенных на территории РФ;

– работник по медицинским показаниям проходил процедуру протезирования в специализированном учреждении;

– у ребенка до 7 лет, посещающего детский сад, карантин, или карантин у другого недееспособного члена семьи, или карантин у самого сотрудника.

За пособием необходимо обращаться не позднее 6 месяцев со дня восстановления трудоспособности после всех случаев, перечисленных выше. Срок может быть продлен по уважительной причине. Решение о продлении принимает территориальный орган страховщика.

Размер пособия по временной нетрудоспособности зависит от продолжительности страхового стажа работника. Страховой стаж - это продолжительность времени уплаты страховых взносов работником. Для определения размера пособий по временной нетрудоспособности в страховой стаж включают периоды работы по трудовому договору, государственной гражданской или муниципальной службы, или иной деятельности, в течение которой работник подлежал обязательному социальному страхованию [53].

Размеры пособия по временной нетрудоспособности [53]:

- страховой стаж до 5 лет – 60% среднего заработка;
- страховой стаж от 5 до 8 лет – 80% среднего заработка;
- страховой стаж от 8 лет и выше – 100% среднего заработка.

Средний заработок определяют за 2 календарных года, которые предшествовали году наступления нетрудоспособности. Учитываемый заработок за каждый календарный год не должен превышать 415 тысяч рублей, даже если фактически он больше.

Основные правила выплаты пособия [53]:

- если нетрудоспособность наступила в период работы или в течение 30 календарных дней со дня прекращения работы;
- выплаты происходят за весь период временной нетрудоспособности до дня восстановления трудоспособности;
- пособие по временной нетрудоспособности выплачивается не более чем за 75 календарных дней, если заболевание или травма наступили в период со дня заключения договора до дня его аннулирования или при заключении срочного трудового договора на срок до 6 месяцев;
- если застрахованное лицо признано инвалидом по медицинским показаниям (кроме заболевания туберкулезом), пособие по временной нетрудоспособности выплачивается, лишь 5 месяцев в календарном году или не более 4 месяцев подряд;
- при заболевании туберкулезом, выплаты производят до дня восстановления трудоспособности (установление инвалидности).

### **Заключение по разделу**

В рамках данного раздела были рассмотрены вопросы соблюдения прав персонала на труд, выполнения требований к безопасности и гигиене труда, к промышленной безопасности, охране окружающей среды и ресурсосбережению, при выполнении работ в 315 аудитории 16а корпуса ТПУ выполняемых лаборантом. На основании данных исследований были

проанализированы вредные и опасные производственные факторы, влияющие на лаборантов в процессе их работы, такие как, отклонения микроклимата, неправильное освещение рабочего места, излучения мониторов, производственные шумы, возможность поражения электрическим током, а также следствие влияния этих факторов на работающего в виде переутомляемости или профессиональных заболеваний, рассмотрено оформление временной нетрудоспособности на предприятии. С учетом этого приведены рекомендации по организации рабочего места оператора, позволяющие повысить производительность труда и свести к минимуму вероятность профессионального заболевания.

## Заключение

В работе проведено исследование особенностей тыльного упрочнения и разрушения мишеней из аустенитной стали под воздействием мегавольтного электронного луча. На основании полученных данных сделаны следующие выводы.

1. Установлено, что в стали 304L с толщиной мишени (2+8 мм) под действием бегущей УВ сжатия происходит объемное упрочнение материала, степень которого снижается за счет затухания УВ по глубине. При увеличении числа циклов нагружения объемное упрочнение продвигается вглубь мишени. Максимум микротвердости во фронтальном упрочненном слое (зона 1) локализован на глубине не превышающим 0,1 – 0,5мм.

2. При отсутствии тыльного откола ( $h = 10$  мм) многократное повторное нагружение бегущей ударной волны и отраженной от тыльной поверхности волны растяжения приводит к формированию тыльного упрочненного слоя, микротвердость которого не превышает 2 – 2.4 ГПа.

3. Профили микротвердости с увеличением числа импульсов нагружения полностью коррелирует с распределением доли sdвойникованных зерен по всей глубине мишени.

4. Показано, что не зависимо от числа импульсов нагружения (1 – 6) тыльного откола или формирования микропор не выявлено. Деформационные двойники начинают формироваться только после 5 импульсов нагружения в зернах с благоприятной ориентацией по отношению к нагрузке.

5. В работе разработаны разделы «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» и «Социальная ответственность».

## Список используемой литературы

1. Марганцовистая сталь. – М.: Metallurgizdat, 1959. – 94 с.
2. Житнов С. В., Давыдов Н. Г., Братчиков С. Г. Высокомарганцевые стали. – М.: Metallurgiya, 1995. – 302с.
3. ГОСТ 977-88 Отливки стальные. Общее техническое условие
4. Воынова Т. Ф. Высокомарганцевые сплавы и стали. – М.: Metallurgiya, 1988. – 340 с.
5. Богачев И. Н., Еголаев В. Ф. Структура и свойства железомарганцевых сплавов. – М.: Metallurgiya, 1973. – 296 с.
6. Элингер З., Вебер К. Производство отливок из специальных сталей. – М.: Mashgiz, 1960. – 141 с.
7. Новомейский Ю. С., Лившиц В. И., Евтюшкин Ю. А. Свойство и применение комплексно-легированных высокомарганцовистых сталей, 1970. – 70 с.
8. Сагарадзе В.В., Уваров А.И. Упрочнение аустенитных сталей. М.: - Наука, 1989. 270 с.
9. Гуляев А.П. Металловедение. Учебник для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Metallurgiya, 1986. 544 с.
10. ГОСТ 5632-72 Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки.
11. B. Bal, B. Gumus, G. Gerstein, D. Canadinc, H.J. Maier. On the micro-deformation mechanisms active in high-manganese austenitic steels under impact loading //Materials Science & Engineering A. – 2015. – 632. – P. 29–34
12. G. Fargas, J.J.Roa, A.Mateo. Effect of shot peening on metastable austenitic stainless steels // Materials Science & Engineering A. – 2015. – 641. – P. 290–296
13. Aref Yadollahi, Nima Shamsaei, Scott M. Thompson, Denver W.Seely. Effects of process time interval and heat treatment on the mechanical and

microstructural properties of direct laser deposited 316L stainless steel // *Materials Science & Engineering A*. -2015. – 644. – P. 171–183

14. J.J. Roa, G. Fargas, A. Mateo, E. Jiménez-Piqué. Dependence of nanoindentation hardness with crystallographic orientation of austenite grains in metastable stainless steels // *Materials Science & Engineering A*. – 2015. – 645. – P.188–195

15. Alexander P. Zhilyaev, I.Shakhova, A.Belyakov, R.Kaibyshev, Terence G.Langdon. Wear resistance and electroconductivity in copper processed by severe plastic deformation // *Wear*, 305 (2013). - P. 89–99.

16. Астафурова Е. Г., Майер Г. Г., Найденкин Е. В.и др. Влияние исходного состояния низкоуглеродистых сталей на структуру и механические свойства, формируемые при равноканальном угловом// *Математика и механика. Физика*. - С. 107-117.

17. Коршунов Л. Г., Черненко Н. Л. Влияние марганца на износостойкость марганцовистых метастабильных аустенитных сталей // *Трение и износ*, 1984. - Т. V. - №1. - С.106-112.

18. Филиппов М. А., Студенок Е. С., Эфрос Б. М. и др. Роль структурных превращений в слоях приработки аустенитных сталей при сопротивлении их абразивному изнашиванию // *Трение и износ*, 1993. Т. 14. №3. С.532-538.

19. Кульков С.Н., Гнусов С.Ф. Карбидостали на основе карбидов титана и вольфрама. НТЛ, 2006. 240 с.

20. Krasnikov V. S., Mayer A. E. Numerical investigation of the change of dislocation density and microhardness in surface layer of iron targets under the high power ion- and electron-beam treatment // *Surface & Coatings Technology*, 212 (2012). - P.79–87.

21. Строк Л.П., Красиков К.И., Шаурова Н.К. Исследование тонкой структуры стали 110Г13Л после высокоскоростного деформирования // *Известия вузов. Физика*, 1973. - № 7.-С. 72-77.

22. Champion A. R., Rohde R. W. Hugoniot Equation of State and the Effect of Shock Stress Amplitude and Duration on the Hardness of Hadfield Steel // Journal of applied physics, 1970. - V 41. - № 5. - P. 2213-2223.

23. Горбатенко Н.А., Клевцов Г. В. Структурные изменения в зонах пластической деформации при ударном нагружении метастабильных аустенитных сталей // Проблемы прочности, 1991. - №9. - С. 72-75.

24. Марков А.Б., Кицанов С. А., Ротштейн В.П. и др. Динамическое разрушение меди при воздействии релятивистского сильнофокусированного электронного пучка // Известия вузов. Физика, 2006. - № 7. - С. 69-74.

25. Дударев Е.Ф., Марков А. Б., Табаченко А.Н. и др. Откольное разрушение крупнозернистого и ультрамелкозернистого алюминия при воздействии наносекундного релятивистского сильнофокусированного электронного пучка // Известия вузов. Физика, 2006. - № 12. - С. 32-38.

26. Гньюсов С. Ф., Ротштейн В. П., Полевин С. Д., Кицанов С. А. Высокоскоростная деформация и откольное разрушение стали Гадфильда при воздействии сильнофокусированного наносекундного релятивистского электронного пучка // Письма в ЖТФ, 2010. - Т 36. - вып. 17. - С. 48-53.

27. Лыков С. В., Итин В. И., Ротштейн В.П. и др. Эволюция волн напряжений, возбуждаемых в металлах импульсным электронным пучком // Доклады Академии наук СССР, 1989. - № 11. - С. 859-861.

28. Иванов Ю. Ф., Итин В. И., Месяц Г. А. и др. Диссипация энергии волны напряжений и структурные изменения в сталях, облучённых импульсным электронным пучком // Доклады Академии наук СССР, 1991. - Т 321. - № 6. - С. 1192-1196.

29. Итин В. И., Коваль И. Н., Лыков С. В. И др. Поверхностное упрочнение сплавов на основе железа при воздействии интенсивного импульсного электронного пучка // Известия вузов МВ и ССО СССР. Физика, 1985. - № 6. - С. 38-43.

30. Григорьев С. Н., Смоленцев Е. В., Волосова М. А. Технология обработки концентрированными потоками энергии: учебное пособие – Старый Оскол, 2009. – 280 с.

31. Казаков Ю. Ф. Концентрированные потоки энергии и физические основы их генерации: учебное пособие. – Саратов, 2001. – 100 с.

32. Гнусов С.Ф., Ротштейн В.П., Полевин С.Д., Кицанов С.А. Деформационное поведение и откольное разрушение стали Гадфильда при ударно-волновом нагружении. // Известия высших учебных заведений. Физика, 2010. №10.– 56-62 с.

33. S.F. Gnusov, V.P. Rotshtein, A.E. Mayer, V.V. Rostov, A.V. Gunin, K.V. Khishcheenko, P.R. Levashov. Simulation and experimental investigation of the spall fracture of 304L stainless steel irradiated by a nanosecond relativistic high-current electron beam. Int. J. Fract (2016).

34. S.F. Gnusov, V.P. Rotshtein, A.E. Mayer, E.G. Astafarova, V.V. Rostov, A.V. Gunin, G.G. Maier. Comparative study of shock-wave hardening and substructure evolution of 304L and Hadfield steels irradiated with a nanosecond relativistic high-current electron beam // Journal of Alloys and Compounds – (2017) - № 714 P. 232 – 244.

35. E. Moin, L.E. Murr. Interactive effects of shock loading parameters on the substructure and mechanical properties of nickel and stainless steel. Materials Science and Engineering, 37 (1979) 249-269.

36. Атрошенко А.П., Федоров В.И. Металлосберегающие технологии кузнечно-штамповочного производства. - Ленинград: Машиностроение, 1990. - 279 с.

37. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: метод. указания / Том. пол-й. ун-т. – Томск 2014. – 73 с.

38. . Экономические расчеты в дипломных проектах по техническим специальностям: Метод. указания для студентов / Сост.: Л.И. Горчакова, М.В. Лопатин. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. - 28 с.

39. Политика доходов и заработной платы. Под ред. П. В. Савченко и Ю. П. Кокина. М.: Юристъ, 2000. 456 с.
40. ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.»
41. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы" (с изменениями на 21 июня 2016 года)
42. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности
43. СанПиН 2.2.4.3359–16.Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах.
44. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95
45. Расчёт искусственного освещения. Методические указания к выполнению индивидуальных заданий для студентов дневного и заочного обучения всех специальностей. – Томск: Изд. ТПУ, 2005. – 9 с.
46. ГОСТ Р 2.2.2006–05. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда.
47. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны
48. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
49. ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация».
50. СанПиН 2.2.4.1191-03 Электромагнитные поля в производственных условиях.
51. ППБ 01-03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации.

52. Охрана окружающей среды: Учеб для техн. вузов / С.В. Белов, Ф.А. Барбинов, А.Ф. Козьяков и др.; Под ред. С.В. Булова, 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 1991. – 319 с.

53. Закон «Об обязательном социальном страховании на случай временной нетрудоспособности и в связи с материнством» от 29.12.2006 № 255-ФЗ.

**Приложение А**  
(справочное)

**Section (1)**  
**Review of literature**

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ71	Мирошников Егор Викторович		

Консультант – лингвист ОИЯ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОИЯ	Смирнова У.А.			

## **1 Literature review**

### **1.1 Hadfield Steel**

Hadfield steel is called in honor of the English metallurgist Robert Hadfield and it was invented by him in 1882. Robert Hadfield established that this steel is not similar to other steels at all, because after tempering the forged sample did not become firmer as other steels, but it became softer. It was not the only surprise – the new steel was resistant to turning and milling processing. After cold forging areas, which accounted for the hammer blows, became hard, and the greater was the degree of deformation, the harder the steel became. Due to the high hardness and wear resistance, as well as the ability to withstand and absorb strong impacts without destruction, Hadfield steel quickly gained recognition in the industry [1].

Hadfield steel plays an important role in mechanical engineering as a structural material. A product from such steel under operating conditions, usually without losing elastic and viscous properties, develops high strength, hardness and wears resistance of the surface layers subjected to external influence. Railroads crosspieces, bars on prison windows, caterpillar tracks, crushers details are made of Hadfield steel [2].

Hadfield steel or 110G13L steel [3] contains 0.9 – 1.5 % C; 11.5 – 15 % Mn; 0.3 – 1.0 Si;  $\leq 0.05$  % S;  $\leq 0.12$  % P;  $\leq 1$  % Cr;  $\leq 1$  % Ni;  $\leq 0.3$  % Cu. And the ratio of manganese to carbon corresponds to at least 10.

Steel with a content of 12 – 14 % Mn is a standard brand for quarry equipment. When processing particularly abrasive materials, the riveted layer, usually having a depth of about 3 mm, can be worn or removed due to abrasive wear on impact, which leads to rapid wear of the softer non-riveted base metal. This steel brand has an initial hardness of about 200 NV. During operation, the hardness increases to about 450 NV [2].

Manganese is an austenitizing element, which strongly extends  $\gamma$ -solid solution in alloys with iron. Unlike most metals, which form an interatomic bond

with a free electrons gas, manganese forms a covalent bond, which also remains in mixed ferromanganese crystals. The covalent bond is carried out by couples of equivalent electrons with the anti-parallel spins belonging at the same time to two neighboring atoms. The development of the covalent bond promotes a reduction of compactness of a crystal lattice and strongly affects the mechanical properties of a crystal [4].

Manganese belongs to transitional metals with the blank d-cover. From all elements of the periodic table, transitional metals have the greatest bound energy. All modifications of manganese have properties, extremely high coefficient of thermal expansion and high specific resistance, abnormal for pure metal.

At joint presence at the steel of manganese and carbon, the effect of the expansion of  $\gamma$ -area amplifies. Carbon has a significant effect on the physical and mechanical properties of high-manganic steel. The concentration of carbon of 1.0 – 1.2 % is optimum. An excess of the specified limits of the concentration of carbon leads to a sharp decrease in impact strength of steel and to the less intensive growth of wear resistance. It is connected with the growth of grain and, therefore, increase in tendency became to cracking after casting and heat treatment [5]. The decrease in the concentration of carbon worsens strength characteristics, and wear resistance of steel, and at contents of carbon 0.8 % and below in structure of steel can appear a martensitic component, and its properties sharply worsen. The limit of stability of manganic steel at the content of 13 – 14 % of Mn makes 0.8 – 0.9 % C [2].

Wide fluctuations in the content of manganese (10 – 15 %) in steel have little effect on its properties, and the excessive increase in the content of manganese in steel (above 12 – 13 %) leads to grain growth. By reducing the content of manganese in steel up to 9 – 11 %, the resistance of steel is reduced.

With a content of 1.0 – 1.3 % carbon and 11 – 14 % manganese in high-manganese steel, austenite becomes very stable, but the critical rate of carbides release is so high that a purely austenitic steel structure requires high cooling rates, while casting must have a uniform cross-section. Steel with a pure austenitic

structure without carbides is binding and difficult to deform in cold condition. The presence of carbides significantly impairs its mechanical properties. This includes classic Hadfield steel [6].

Figure A.1 shows a diagram of the state of Fe-C-Mn at different carbon and manganese contents [7]:

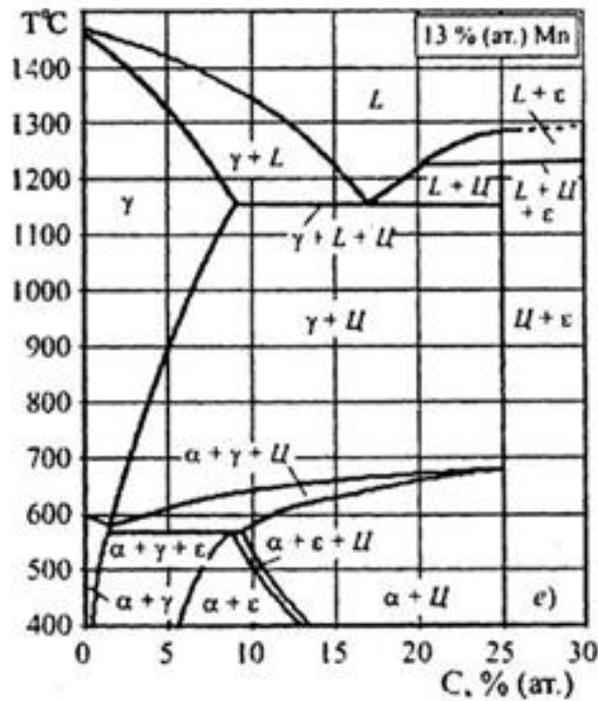


Figure A.1 – A polythermal section of the chart of a condition of Fe-C-Mn alloy from 13% of manganese [7]

The microstructure of Hadfield steel is austenite with a carbide phase of variable structure, which is concentrated generally on borders of grains. Carbides are accompanied with releases of ferrite which were formed because of the impoverishment of solid solution by carbon. It can be forged and rolled at high temperature and as well as hardened to fix the austenitic structure. Hadfield steel is capable of extremely intensive hardening during mechanical hardening processing [7].

The yield strength of manganese steel is most effectively affected by strong carbide forming agents. The carbide forming agents like Cr, W, Mo improve the strength characteristics of steel, reduce its ductility. Steel with such additives has a

rough dendritic structure with a carbide mesh along the grain boundaries and requires a fairly complex heat treatment with high tempering temperatures (up to 1100 – 1150 °C) [5].

But in most cases, the main additional alloying element is chromium. Chromium is an inexpensive element and its quantitative content in Hadfield steel is about 1 %, which improves the machinability of steel, strength and wear resistance.

Fine grains formed during deformation have a beneficial effect on the mechanical properties of high-manganese steel. With the increase in the time of cold deformation, the steel is more strengthened– there occur a hardening and sealing of the crystal lattice. Hardness reaches 500 – 650 HB. With a deformation close to the point of destruction of the metal, the steel can acquire hardness equal to 800 – 850 HB [1].

Physical and mechanical properties of Hadfield cast steel are listed in tables 1 and 2.

Table A.1 – Mechanical properties [2]:

A temporary resistance, MPa	Fluidity limit $\sigma_{0.2}$ , MPa	Relative narrowing $\psi$ , %	Relative lengthening plasticity $\delta$ , %	Brinell hardness HB
800-900	310-350	30-50	15-20	200

Table A.2 – Physical properties [2]:

The module of elasticity of E, MPa	The module of the shift of G, MPa	Density $\rho$ , kg/CBM
200000	78000	7820

Hadfield steel can withstand a compressive load of up to 550 MPa, with plastic deformation of 50 – 55 % [5].

The fluidity of this steel is good and improves with increasing carbon content. Also, the fluidity is improved by manganese, silicon, and phosphorus. The

shrinkage of high-manganese steel during casting is much higher than that of carbon steels. The great importance of linear shrinkage leads to the appearance of hot cracks and shrinkage shells in castings [6].

The tendency of Hadfield steel to form hot cracks is due not only to the large linear shrinkage but also to the following reasons: reduced thermal conductivity, high resistance of the mold to shrinkage, increased sensitivity of the metal to overheating during casting and stress concentration in parts of castings, low ductility and strength of steel at high temperature[2].

Impact strength – is one of the most important characteristics of the reliability of castings of high-manganese steel. Despite a large number of works devoted to steel, there is still no unified theory of its self-hardening under shock loading. According to some authors, a major role in the hardening of steel Hadfield plays grinding blocks and microstresses. The high viscosity of austenite along with sufficient strength and durability makes Hadfield steel an indispensable material for parts that work on wear and impact at the same time. Steel castings are rarely subjected to additional processing; as it is poorly processed by cutting due to the surface riveting during cutting [5]. Impact strength is sensitive to changes in the chemical composition of steel, as well as the parameters of its melting, casting, crystallization and heat treatment. However, there is evidence that the impact strength of steel does not depend on its chemical composition and is almost completely determined by the degree of contamination of the metal with non-metallic oxide inclusions in the absence of residual iron-manganese carbides [2].

In conditions of abrasion with significant impact or high specific statistical loads, Hadfield steel has high wear resistance, but this steel quickly fails with intensive abrasive wear (when the impact or specific static load is small and unstable). Under these conditions, the wear resistance of high-manganese steel is low. This is because the surface of the castings of high-manganese steel during operation does not have time to get enough hardening (not riveted) [5]. Therefore, the castings of manganese steel should be tempered [6].

## **1.2 Austenitic steels and their hardening mechanisms**

Austenitic steel is a high-alloyed iron alloy alloyed with elements that expand the  $\gamma$  - region: carbon, Nickel, manganese, cobalt; as well as expanding the area of  $\alpha$  - iron: chromium, aluminum, tungsten, molybdenum, niobium, silicon, titanium. Such steels have predominantly a structure with a face-centered cubic (HCC) lattice from the crystallization point to cryogenic temperatures. There is also a phase with a volume-centered cubic (BCC) lattice represented by a high-alloyed  $\delta$ -ferrite in the amount of 0 – 10 vol.%. Austenitic steel is divided into the following bases: nickel, chromium-nickel, manganese, chromium-manganese-nickel, chromium-manganese, chromium-nickel-molybdenum and high-silicon. The most widely used alloys contain nickel, chromium-nickel or manganese.

Austenitic steels are mainly used as corrosion-resistant, refractory and high temperature resistant, cryogenic structural materials in chemical, thermal power, and nuclear plants, where they are exposed to the combined effects of stress, high temperature, and aggressive environments.

The strength of austenitic steels depends on the properties of austenite and the factors that determine the fine structure (substructure) of steel. Alloying elements, additionally introduced to stabilize austenite and steel hardening, can form new phases in interaction with each other, changing the number and composition of the released phases [8].

Austenitic steels are well subjected to hardening by various mechanisms: solid, deformation, dispersion and hardening due to magnetic ordering.

## **1.3 Austenitic 12Cr18Ni10Ti stainless steel**

12Cr18Ni10Ti steel is chromium-nickel austenitic stainless steel. Due to its unique quality characteristics, the steel of this brand can be used in various fields of production and industry. The material is widely used in food, oil, fuel and energy, chemical industry, mechanical engineering and in aircraft and space

industries. In the chemical industry, 12Cr18Ni10Ti steel is used for the manufacture of containers designed for high-pressure operation, as well as in devices for the production of liquid oxygen. Corrosion-resistant steel is used for the production of welded equipment and structures, the operation of which involves contact with oxidizing media, organic solvents, inorganic acids of moderate concentration. This material is used to produce pipes that transport solutions of aggressive liquids, such as phosphoric, nitric, acetic acid, as well as their bases and salts. Steel is widely used in cryogenic engineering (at temperature up to  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), and also for reaction, heat exchange, and capacitive equipment, including for high-pressure pipelines and steam heaters with the provided operational temperature up to  $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Details for collectors of exhaust systems, the oven equipment and muffles of steel of this brand are made. Besides, it is used for the production of a corrosion-proof leaf, circles, a wire (including for welding works) and pipes. Grids, springs, cables, and ropes of steel threads are also made [9].

According to [10] 12Cr18Ni10Ti steel contains up to 12 % of carbon, up to 0.8 % of silicon, up to 2 % of manganese, 9 – 11 % of nickel, up to 0.02 % of sulfur, up to 0.035 % of phosphorus, 17 – 19% of chromium, up to 0.3 % of copper, 0.4 – 1 % of titanium and about 67 % of iron.

The introduction of a sufficient amount of nickel in 18 % chromium steel makes it austenitic which provides better mechanical properties, less tendency to grain growth, as well as more corrosion-resistant and not cold-breaking. Stainless steel that contains 18 % of chromium and 10% of nickel is the most widely used in mechanical engineering, consumer goods, as well as in architecture and sculpture. The Fe-Cr-Ni system shows the conditions of phase formation in CR-Ni stainless alloys. Figure A.2 shows a horizontal cut at  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$  of the Fe-Cr-Ni system (solid lines). Single-phase  $\gamma$  - and  $\alpha$ -regions are separated by two-phase  $\gamma + \alpha$ . When the amount of chromium is more than 20 % of the  $\alpha$ -phase (chemical compound FeCr) appears. The position of the two-phase region  $\gamma + \alpha$  depends on the temperature. With a decrease in temperature below  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the region  $\gamma + \alpha$  goes to the right,

and its extreme position at 20 °C is shown by dotted lines ending at the points *c* and *g*. When the temperature rises, the region goes to the left, and its extreme position at 1100 °C shown by dotted lines ending at the points *a* and *d*.

Therefore, the alloys lying below the *a-b-c* line have a complete  $\gamma \leftrightarrow \alpha$  - recrystallization with a ferrite structure at room temperature. Between the *a-b-c* line and *d-e-f-g* line, the semi-ferritic (or semi-austenitic) alloys with partial  $\gamma \leftrightarrow \alpha$ -transformation are enclosed. Alloys located on the left of the *b-e* line are ferrite, and alloys located on the to the right *f-g* line are austenitic.

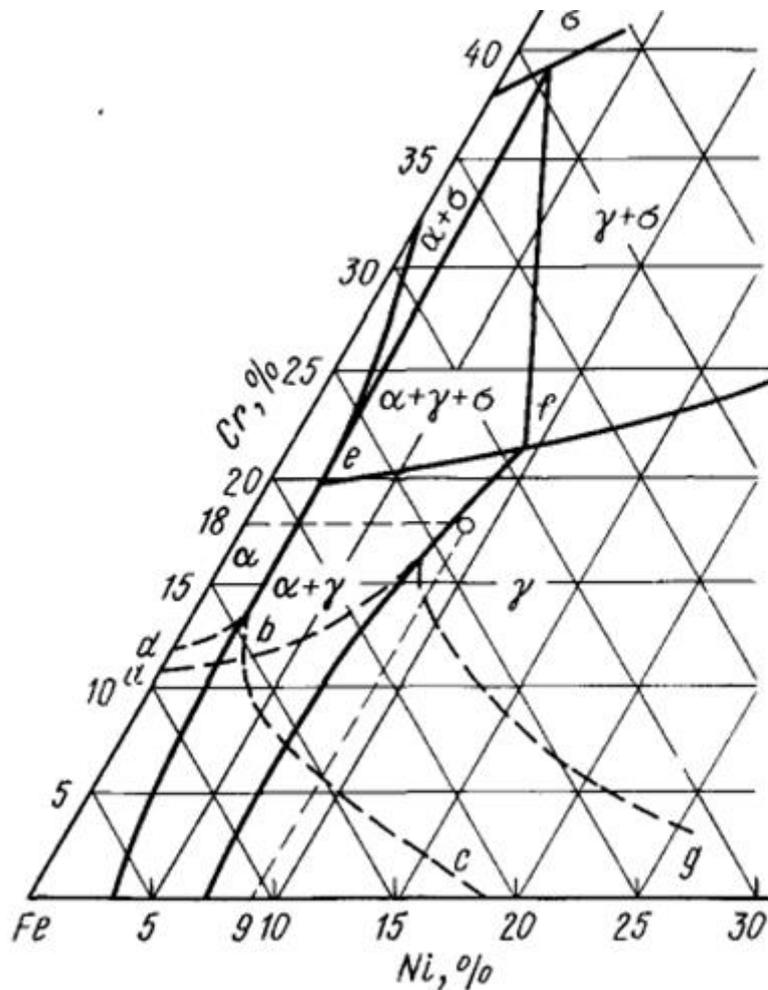


Figure A.2 -The Iron angle of Fe-Cr-Ni system. The solid line represents the isothermal cut at 650°C

The structural state of alloys that contain 18 % of chromium and 8 – 15 % of nickel depending on the fluctuation of structure can be steady and unstable. In

certain cases, plastic deformation at a low temperature can cause the formation of so-called hexagonal  $\epsilon$  - martensite (an intermediate state) which then can pass into usual  $\alpha$ -martensite.

Austenitic steels that contain 18% of chromium and 8-10% of nickel are structurally unstable, so cooling the material at low temperatures or plastic deformation at room temperature can cause the formation of martensite. In alloy that contains 18% of chromium and 8 – 12 % of nickel, the formation of martensite can be caused only by deformation at temperatures below 0 °C. Alloys that contain 18 % of chromium and more than 14 % of nickel possess stable austenite; therefore, neither cooling nor deformation at low temperatures can cause the formation of  $\alpha$ -phase. The American SS304L steel is the analog of Russian 08Cr18Ni10Ti steel.

Industrial chromium-nickel steels are naturally not pure Fe-Cr-Ni alloys but contain impurities. These impurities, dissolving in the main phases ( $\gamma$  and  $\alpha$ ), affect the states and equilibrium and the kinetics of  $\gamma \leftrightarrow \alpha$ -transformation. If the impurities form new phases, such as carbides, nitrides, intermetallic alloys, etc., they can significantly change the properties of steel, although their effect on  $\gamma \leftrightarrow \alpha$ -transformation, in this case, is less significant.

Elements dissolved in  $\gamma$  - and  $\alpha$ -phases can be divided into two categories: contributing to  $\gamma \leftrightarrow \alpha$ -transformation (called ferrite-forming) and preventing this transformation (called austenite-forming).

Carbon, nitrogen, and manganese are austenite-forming elements, which have a similar effect as nickel. Molybdenum, tungsten, titanium, niobium, tantalum, and silicon are ferrite-forming elements, which have a similar effect as chromium. It is quite difficult to decide, which structural group should industrial composite chromium-nickel steels, containing carbon, nitrogen, manganese, silicon, titanium, and other elements, refer to; the threefold Fe-Cr-Ni system (Figure 3) is not appropriate for this purpose.

For these purposes, it is possible to use the schematic chart showing a structural state of the alloy at the room temperature depending on ferrite-forming and austenite-forming elements (Figure A.3). The influence of each element is

brought to the influence of chrome and nickel by the corresponding coefficient. So, carbon as austenite - forming element influences 30 times stronger than nickel, and niobium – is twice weaker than chromium.

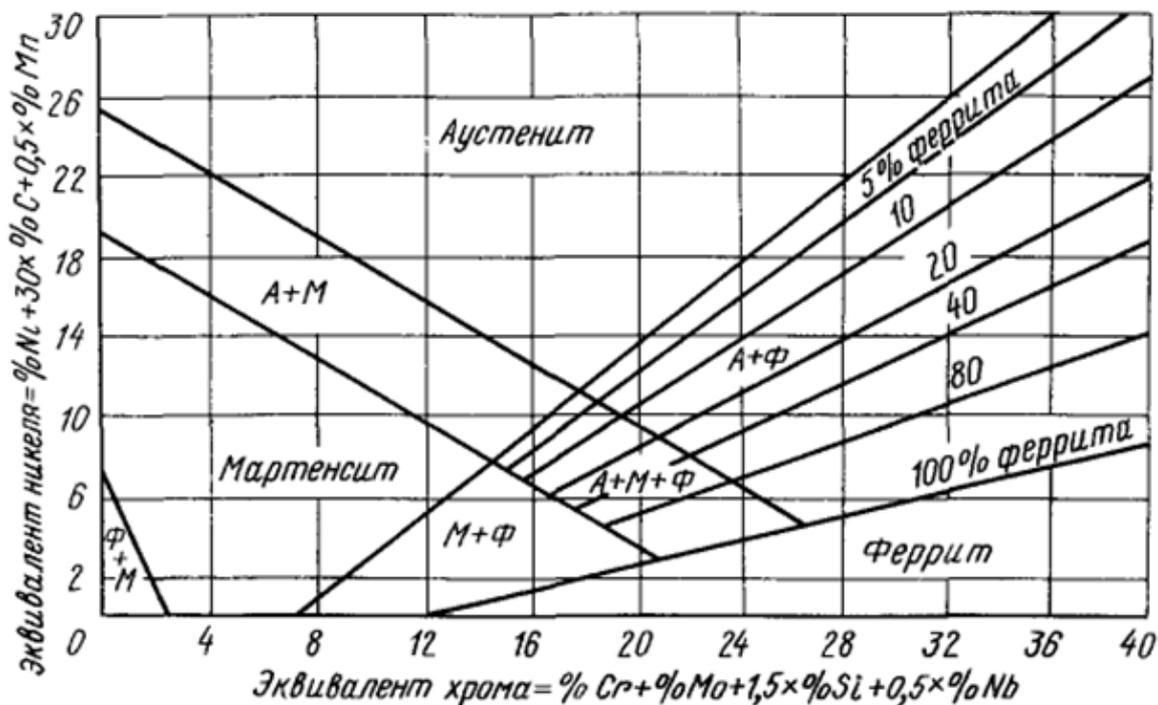


Figure A.3 - Structural chart of stainless steels

The same class includes steels, which austenite even without signs of  $\gamma \rightarrow \alpha$  – transformation during cooling to room temperature is unstable; the austenite turns into martensite under influence of cooling or plastic deformation.

Austenitic stainless steels are widely used not only because of their high anticorrosive properties but also because of their high technological and mechanical properties. These steels are well rolled in hot and cold conditions, in the cold state they can withstand deep drawing and profiling, allow using electric welding, without brittle behavior of the heat-affected zones.

Heat treatment of austenitic stainless steels is relatively simple and consists of quenching in water from 1050 – 1100 °C. Heating to these temperatures causes the dissolution of chromium carbides, and rapid cooling fixes the state of the supersaturated solid solution. Slow cooling is unacceptable, since at the same time,

as with the release, it is possible to release carbides, leading to a deterioration in plasticity and corrosion resistance. In addition, during hardening recrystallization processes occur, eliminating the effects of plastic deformation, which is often exposed to austenitic stainless steel. As a result of hardening, the hardness of these steels does not increase, but decreases, therefore, for austenitic stainless steels, hardening is a softening thermal operation.

The mechanical properties of austenitic stainless steels in the hardened (softened) state is characterized by low yield strength, low strength, and very high ductility.

Table A.3 – The mechanical properties [9]:

$\Sigma_B$ temporary resistance, MPa	Fluidity limit $\sigma_{0.2}$ , MPa	Relative narrowing $\psi$ , %	Relative lengthening plasticity $\delta$ , %	Brinell hardness HB
490	195	55	40	

Table A.4 – Physical properties [9]:

Physical properties of steel 12Cr18Ni10Ti						
T (°C)	E $10^{-5}$ (MPa)	$\alpha 10^6$ (1/°C)	$\lambda$ (W/(m*°C))	P (kg/m <sup>3</sup> )	C (J/(kg*°C))	R $10^9$ ( $\Omega \cdot m$ )
20	1.98		15	7920		725
100	1.94	16.6	16		462	792
200	1.89	17	18		496	861
300	1.81	17.2	19		517	920
400	1.74	17.5	21		538	976
500	1.66	17.9	23		550	1028
600	1.57	18.2	25		563	1075
700	1.47	18.6	27		575	1115
800		18.9	26		596	
900		19.3				

The radical way of hardening austenitic steels is a cold bending; when deformation reaches about 80 – 90 % the limit of fluidity reaches 980 – 1170 MPa, the tensile strength reaches 1170 – 1370 MPa, while plasticity remains high. It is obvious that this way of hardening is applicable only to such types of products as a thin sheet or a tape, a wire.

If heat treatment in the steels of an austenitic class significantly does not change mechanical properties and is rather simple, then in the steel of a transitional, austenitic and martensitic class durability strongly depends on the modes of heat treatment as at the same time the structural state significantly changes. The modes of heat treatment of the steels of a transitional class differ in big complexity.

Stainless steels of this class have been applying mainly as high strength ones. The most hardened state is obtained with the structure of austenite + martensite tempering.

Such a structural state is obtained as a result of the following heat treatment: quenching on austenite + cold treatment + tempering (aging). Cold treatment leads to the conversion of approximately 40 % of austenite into martensite (Mn point should be located at about 0 °C); tempering at 450 – 500 °C increases strength due to dispersed hardening which occurs mainly in the  $\alpha$ -phase [9].