



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

Школа Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности  
Направление подготовки 15.04.01 «Машиностроение»  
Отделение школы (НОЦ) Отделение электронной инженерии

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Особенности упрочнения и разрушения аустенитной стали в условиях разных схем воздействия мегавольтного электронного луча

УДК 621.791.722:669.15-194.56

#### Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ81	Барский Н.А.		

#### Руководитель

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

#### КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Маланина В.А.	к.э.н		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ООД	Федорчук Ю.М.	д.т.н, профессор		9.06.2020

#### Консультант-лингвист

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОИЯ	Марцева Т.А.	к.филол.н.		

#### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

Томск – 2020г.

**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 и 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



<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной 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></p>	<p>Титульный лист (название работы), цель, задачи.  Литературный обзор  Материалы, оборудование и методы исследования.  Макроструктура исходных образцов стали 304L.  Схема нагружения образца толщиной 8 мм одним импульсом; 1 – источник МЭП, 2 – образец-мишень, 3 – МЭП  Профиль микротвердости по толщине мишени после трехкратного нагружения исходного образца толщиной 8 мм  Микроструктура фронтальной части мишени после трехкратного нагружения МЭП  Профиль микротвердости по толщине мишени после повторного нагружения одним импульсом МЭП образца №LP-13  Микроструктура центральной части мишени после повторного нагружения одним импульсом МЭП образца №LP-13  Профиль микротвердости по толщине мишени после повторного нагружения одним импульсом МЭП образца №LP-14  Микроструктура фронтальной (фронт II) части мишени после повторного нагружения одним импульсом МЭП образца №LP-14  Профиль микротвердости по глубине (отсчет от дна лунки абляции) в ударно нагруженном образце стали 304L и изменение амплитуды ударной волны в разные периоды времени при распространении ее в нержавеющую аустенитную сталь.  Экономическая часть, и социальная ответственность.  Заключение и выводы.</p>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p>Основная часть магистерской диссертации</p>	<p>Гнюсов Сергей Федорович</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Маланина Вероника Анатольевна</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Федорчук Юрий Митрофанович</p>

Часть магистерской диссертации на немецком языке	Щеголихина Юлия Викторовна
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках</b>	
1. Материалы, оборудование и методы исследования	

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

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭИ	Гнюсов Сергей Федорович	д.т.н, профессор		28.01.2020г

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ81	Барский Николай Андреевич		28.01.2020г

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

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности (ИШНКБ)  
 Направление подготовки (специальность) 15.04.01 «Машиностроение»  
 Уровень образования магистратура  
 Профиль «Машины и технологии сварочного производства»  
 Отделение электронной инженерии  
 Период выполнения (осенний / весенний семестр 2019 /2020 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:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
04.02.2020	1 Литературный обзор	25
25.02.2020	2 Материалы, оборудование и методы исследования	5
29.03.2020	3 Экспериментальная часть	35
15.04.2020	4 Выводы	10
22.04.2020	5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
06.05.2020	6 Социальная ответственность	10
13.05.2020	7 Часть магистерской диссертации на немецком языке	5

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭИ	Гнюсов С.Ф.	Д.Т.Н., профессор		30.01.2019

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

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

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1ВМ81	Барский Николай Андреевич

<b>Школа</b>	<b>ИШНКБ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>ОЭИ</b>
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	15.04.01/Машиностроение

Тема ВКР

Особенности упрочнения и разрушения аустенитной стали в условиях разных схем воздействия мегавольтного электронного луча

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): Материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	<i>Стоимость применяемого оборудования для проведения эксперимента, заработная плата с учетом районного коэффициента, стоимость электроэнергии</i>
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	<i>Коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды – 30.2%</i>

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

1. Оценка коммерческого потенциала инженерного проекта (ИП)	1.1 Потенциальные потребители результатов исследования 1.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения 1.3 FAST - анализ 1.4. SWOT – анализ
2. Разработка устава научно-технического проекта	2.1. Устав проекта 2.2. Организационная структура проекта
3. Составление бюджета инженерного проекта (ИП)	3.1 План проекта (календарный план НТИ) 3.2 Бюджет проекта исследования (планируемые затраты на выполнения НТИ) 3.3 Организационная структура проекта (выбор организационной структуры научного проекта)
4. Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности ИП и потенциальных рисков	4.1 Оценка сравнительной эффективности исследовани

**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 ИП
7. Инвестиционный план. Бюджет ИП
8. Основные показатели эффективности ИП

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, зван	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Маланина В.А.	к.э.н		26.02.2020г

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ81	Барский Н.А.		26.02.2020г

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1ВМ81	Барский Николай Андреевич

<b>ШКОЛА</b>	<b>ИШНКБ</b>	<b>Отделение</b>	
<b>Уровень образования</b>	Магистр	<b>Направление/специальность</b>	15.04.01 «Машиностроение»

**Тема дипломной работы:** «Особенности упрочнения и разрушения аустенитной стали в условиях разных схем воздействия мегавольтного электронного луча»»

<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p>Лаборатория находится в 16-ом уч. корпусе, оборудована холодной и горячей водой, сливом, вентиляцией, вытяжным шкафом, письменным столом, оргтехникой</p>
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<p><b>1. Производственная безопасность</b>  <b>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</li> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты;</li> <li>– (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства).</li> </ul> <p><b>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– механические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– термические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).</li> </ul>	<p>К числу вредных факторов на рабочем месте следует отнести наличие электромагнитных полей на рабочем месте, наличие шума. периодическое несоответствие освещенности рабочего места (при этом требуется провести расчет освещения на рабочем месте с рисунком (размеры в системе СИ)), присутствие не оптимальных метеоусловий на рабочем месте,</p> <p>К числу опасных факторов следует отнести наличие электроисточников, оборудования с повышенной температурой поверхности, присутствие механического оборудования, горючих материалов, тем самым, присутствие повышенной степени пожароопасности.</p> <p>Для всех случаев вредных и опасных факторов на рабочем месте указаны ПДУ, ПДД, допустимые диапазоны существования, в случае превышения этих значений перечислены средства коллективной и индивидуальной защиты; приведены классы электроопасности помещений, а также безопасные номиналы тока, напряжения, сопротивления заземления, и категории пожароопасности помещения, марки огнетушителей, их назначение.</p>

<p><b>2. Экологическая безопасность:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– защита селитебной зоны</li> <li>– анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</li> <li>– разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.</li> </ul>	<p>Наличие отходов (металлическая стружка, абразивная пыль, черновики бумаги, отработанные картриджи принтера,) потребовали разработки методов (способов) утилизации перечисленных отходов. Также требует разработки их утилизации.</p>
<p><b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения;</li> <li>– выбор наиболее типичной ЧС;</li> <li>– разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>– разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</li> </ul>	<p>Приводятся возможные для Сибири ЧС; Возможные ЧС: морозы, диверсия</p> <p>- разрабатываются превентивные меры по предупреждению ЧС;</p> <p>- разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС;</p> <p>разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий</p>
<p><b>4. Перечень нормативно-технической документации, использованной при написании раздела СО</b></p>	<p>Приведены перечень НТД, используемых в данном разделе, схема эвакуации при пожаре, схема размещения светильников на потолке согласно проведенному расчету.</p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	26.02.2020г.
--	--------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ООД	Федорчук Ю.М.	д.т.н.		26.02.2020г.

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ81	Барский Н.А.		26.02.2020 г.

## Реферат

Выпускная квалификационная работа – 144 страниц., 18 рисунков, 20 таблица, 52 использованных источника, 15 листов демонстрационного материала (слайдов), приложение 1.

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

Объектом исследования являются образцы стали 304L.

Цель работы - исследование влияния многократного динамического нагружения образцов стали 304L при изменении схемы воздействия на эволюцию структуры материала по объему мишени.

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;
- 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.

## **Abstrakt**

Die Qualifizierungsarbeiten für Absolventen bestehen aus 144 Seiten, 18 Abbildungen, 20 Tabellen, 52 Quellen und 15 Blättern Demonstrationsmaterial (Folien).

Schlüsselwörter: Hochstrom-Elektronenstrahlen, austenitischer Stahl, Kaltverfestigung, Zwillingsbildung, Mikrostruktur, Mikrohärt.

Gegenstand der Forschung sind die Proben aus 304L Stahl.

Ziel der Forschung ist es, die Merkmale der hinteren Härtung eines Targets aus 304L-Stahl zu untersuchen, wenn es einem Megavolt-Elektronenstrahl ausgesetzt wird.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurden folgende Aufgaben erfüllt:

- Die Analyse der in- und ausländischen Literatur zu der untersuchten Frage wurde durchgeführt und die Problemdefinition einer Forschung durchgeführt.

- Proben wurden vorbereitet und Experimente zur Stoßwellenbelastung von MEB-Zielen mit einer Anzahl von Impulsen von 1 bis 6 durchgeführt;

- Diagramme der Mikrohärtverteilung entlang der Achse des Elektronenstrahls mit unterschiedlicher Anzahl von Aufprallimpulsen wurden aufgezeichnet;

- Die Entwicklung der 304L-Stahlstruktur wurde in Abhängigkeit von der Anzahl der Belastungsimpulse über die Zieldicke untersucht.

- Die Analyse der erzielten Ergebnisse und Empfehlungen für die weitere Forschung.

## Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

В настоящей работе применены следующие термины с соответствующими определениями.

Аустенит – твёрдый раствор углерода в гранецентрированной 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 – гранецентрированная 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.

## Оглавление

Введение.....	18
1 Особенности упрочнения высокомарганцовистых и аустенитных сталей	
20	
1.1 Сталь Гадфильда .....	20
1.2 Аустенитные стали и механизмы их упрочнения .....	26
1.3 Аустенитная нержавеющая сталь 12X18Н10Т .....	28
1.4 Деформационное упрочнение аустенита.....	34
1.5 Микродеформационные механизмы, действующие в высокомарганцевых аустенитных сталях под воздействием нагрузки .....	37
1.6 Влияние дробеструйной обработки на метастабильные аустенитные нержавеющие стали .....	40
1.7 Влияние лазерного оплавления стали 316L на микроструктуру и свойства	43
1.8 Зависимость скорости наноиндентирования аустенитных зерен в метастабильных нержавеющих сталях .....	46
1.9 Особенности развития деформации и разрушения аустенитных сталей при динамическом нагружении .....	48
1.10 Концентрированные потоки энергии.....	58
1.11 Постановка задачи .....	59
2. Материалы, оборудование и методы исследования .....	62
2.1 Материал. ....	62
2.2 Оборудование для динамического нагружения.....	62
2.3 Методы исследования. ....	64
3 Результаты и обсуждения.....	65
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	72
4.1 Предпроектный анализ.....	72
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования .....	72

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	73
4.2 Fast – анализ .....	74
4.2.1. Выбор объекта FAST – анализа.....	74
4.2.2 Описание главных, основных и вспомогательных функций, выполняемых объектом .....	74
4.2.3 Определение значимости выполняемых функций объектом .....	75
4.2.4 Определение значимости функций .....	76
4.2.5 Оптимизация функций, выполняемых объектом .....	77
4.3 SWOT – анализ.....	77
4.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации .....	80
4.5 Методы коммерциализации результатов научно технического исследования.....	82
4.6 Инициация проекта.....	82
4.7 Планирование управления проектом.....	85
4.7.1 Структура работ в рамках научного исследования.....	85
4.7.2 Определение трудоемкости выполнения работ.....	86
4.7.3 Разработка графика проведения научного исследования.....	88
4.8 Бюджет научного исследования. Затраты на материалы и эксперименты.....	92
4.9 Расчет фонда заработной платы .....	93
4.9 Определение ресурсной финансовой и бюджетной эффективности исследования.....	97
4.9.1 Оценка сравнительной эффективности проекта.....	97
5.Социальная	ответственность
101	
5.1 Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды .....	102
5.1.1 Электромагнитные поля в производственных помещениях .....	102
5.1.2 Производственный шум .....	104

5.1.3 Исследование освещенности рабочей зоны .....	105
5.1.4 Микроклимат в помещении .....	109
5.2 Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды .....	111
5.2.1 Факторы электрической природы .....	111
5.2.2 Факторы пожарной и взрывной природы.....	116
5.3 Охрана окружающей среды .....	119
5.4 Защита в ЧС .....	120
5.5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	121
Заключение .....	124
Список литературы .....	125
Приложение А .....	130

## Введение

С бурным развитием авиакосмической техники и современного высокоскоростного воздействия на материалы к ним предъявляются жесткие требования по комплексу физико-механических свойств. Материалы и сплавы должны выполнять различные эксплуатационные характеристики, выдерживать статические и динамические нагрузки до максимально высоких значений. Это касается радиотехнической аппаратуры (стойкой к изменению магнитного поля), авиокосмической и ракетной техники (устойчивой к резким перепадам температур, воздействием сильных электромагнитных полей, а так же являться надёжной защитой от коррозии и хорошо сопротивляются ударно-абразивному изнашиванию). Широкое применение в данных условиях нашли аустенитные стали двух систем легирования: хромоникелевые (стали 12Х18Н10Т, 304, 304L) и высокомарганцовистые износостойкие (типа сталь 110Г13) обладающие наиболее лучшим комплексом свойств, и сохраняющиеся в широком интервале температур. Они хорошо себя зарекомендовали и в условиях динамического нагружения при совместном воздействии абразива. К настоящему времени имеется ряд исследований по отклику на такое воздействие структуры материала как с фронтальной, так и с тыльной поверхности образцов. В частности, установлена минимальная толщина материала, которая не приводит к тыльному отколу при воздействии УВ амплитудой ~20 ГПа.

Однако в реальных условиях эксплуатации такому воздействию материал может подвергаться неоднократно, меняя схему нагружения. Это в частности касается воздействия УВ как с фронтальной, так и с тыльной части мишени. Реализовать такое динамическое нагружение в лабораторных условиях очень сложно. Дополнительно это будет осложняться и вопросом сохранности образцов, необходимых для дальнейшего структурного исследования. Поэтому наиболее подходящим способом генерации такого воздействия могут выступать МЭП.

Целью данной работы является исследование влияния многократного динамического нагружения образцов стали 304L при изменении схемы воздействия на эволюцию структуры материала по объему мишени.

# 1 Особенности упрочнения высокомарганцовистых и аустенитных сталей

## 1.1 Сталь Гадфильда

Первое применение стали Гадфильда в военной промышленности: изготовление траков танковых гусениц в Первую мировую войну. Ресурс пробега увеличился с 500 км до 48000 км, то есть почти в 10 раз; с 1915 года и до 80-х гг. XX в. — изготовление пехотных шлемов для солдат и т.д.

Из стали Гадфильда изготавливаются:

- 1) изделия, работающие на истирание;
- 2) сильно нагруженные детали, которым требуется повышенная износостойкость.

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. Сталь Гадфильда (0,9-1,4%С; 13%Mn; 0,8- 1,0%Cr и соотношение марганца к углероду соответствует не менее 10.) обладает уникальными свойствами – высокой пластичностью, способностью к интенсивному деформационному упрочнению, а так же низкой скоростью изнашивания при трении скольжения. Микротвердость стали Гадфильда в процессе трения может возрасти в 3-4 раза и значения 9000-11000 МПа [1]. Следует отметить, что, многие более твердые по сравнению с Г13 материалы уступают ей по износостойкости. Некоторые стали, обладая способностью к наклёпу, уступают стали Гадфильда по износостойкости при трении скольжения, сопровождающемся ударными нагрузками и попаданием абразива в зону трения. Данные представленные в работах [1-3], показывают, что сталь Гадфильда даже в условиях экстремально больших пластических деформаций и высоких температур, имеющих место при трении и сдвиге, сохраняет аустенитную структуру.

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.

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 [1].

Сталь с содержанием 12 – 14 % Mn 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 [1].

Марганец является элементом аустенизатором, который в сплавах с железом сильно расширяет  $\gamma$  – 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 марганцевистой стали при содержании 13 – 14 % Mn составляет 0,8 – 0,9 % C [6].

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 высокомарганцевистой 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 [7].

На рисунке 1 изображена диаграмма состояния Fe–C–Mn при разных содержаниях углерода и марганца [8].

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 [8].

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].

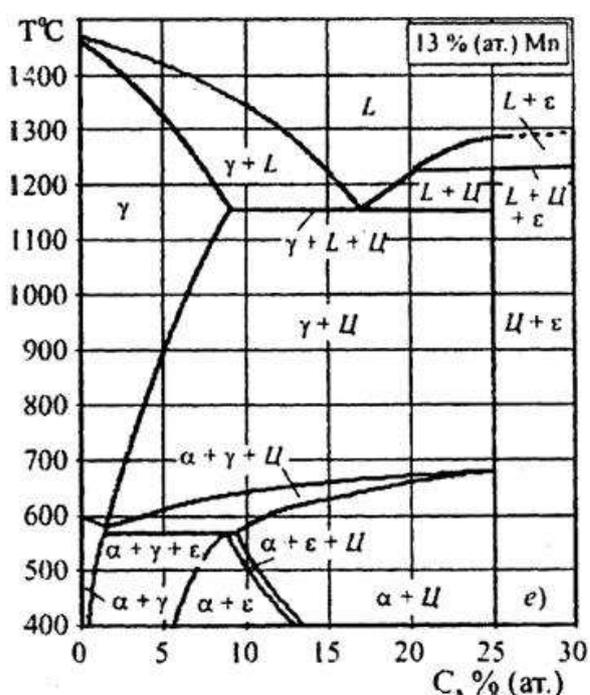


Рисунок 1.1 – Политермический разрез диаграммы состояния сплава Fe–C–Mn с 13% марганца [8]

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 [6].

Физико-механические свойства литой стали Гадфильда указаны в таблицах 1.1 и 1.2.

Таблица 1.1 – 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
800 – 900	310 – 350	30 – 50	15 – 20	200

Таблица 1.2 – 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 высокомарганцовистой стали при литье гораздо выше, чем у

углеродистых сталей. Большое значение линейной усадке приводит к появлению горячих трещин и усадочных раковин в отливках [7].

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 [9].

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 [9].

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 успевают получить достаточное упрочнение (не наклепывается) [5]. Поэтому отливки из марганцевой стали следует закалять [7].

## 1.2 Аустенитные стали и механизмы их упрочнения

К аустенитному классу относятся высоколегированные стали, образующие при кристаллизации преимущественно однофазную аустенитную структуру  $\gamma$ -Fe с гранецентрированной кристаллической (ГЦК) решеткой и сохраняющие ее при охлаждении до криогенных температур. Количество другой фазы - высоколегированного феррита ( $\delta$ -Fe с объемноцентрированной кристаллической (ОЦК) решеткой) изменяется от 0 до 10 %. Они содержат 18...25 % Сг, обеспечивающего жаро- и коррозионную стойкость, а также 8...35 % Ni, стабилизирующего аустенитную структуру и повышающего жаропрочность, пластичность и технологичность сталей в широком интервале температур. Это позволяет применять аустенитные стали 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. 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 гранецентрированной 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

Главный фактор коррозионной стойкости стали - однородность твердого раствора хрома в железе, отсутствие его соединений с углеродом и другими элементами, приводящих к локальному обеднению стали хромом и создающих границы раздела между фазами с дефектными участками кристаллической решетки, где у атомов железа ослаблены межатомные связи. Так, образование карбида хрома  $Cr_23C_6$ , содержащего 94 % Cr, обедняет окружающую матрицу с 18 ...25 % Cr. Поэтому составы коррозионностойких сталей отличаются от жаропрочных минимумом углерода (до 0,02 %), являющегося для них вредной примесью, либо наличием в стехиометрическом отношении стабилизирующих элементов (титан, ниобий), образующих более прочные карбиды, чем хром, что исключает обеднение твердого раствора хромом. Для обеспечения прочности и стабильности аустенита в ряде сталей часть углерода заменена азотом. Он препятствует образованию  $\delta$ -Fe, упрочняет аустенит и не образует карбидов. [10].

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 муфтелей. 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 [11].

Сталь 12X18Н10Т по [12] 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 коррозионностойкой 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 нержавеющих хромоникелевых сплавах дает система Fe–Cr–Ni. На рисунке 1.2 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 с и g, а при повышении температуры область уходит влево и ее крайнее положение при 1100 °С показывает пунктирные линии, заканчивающиеся в точках а, 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.

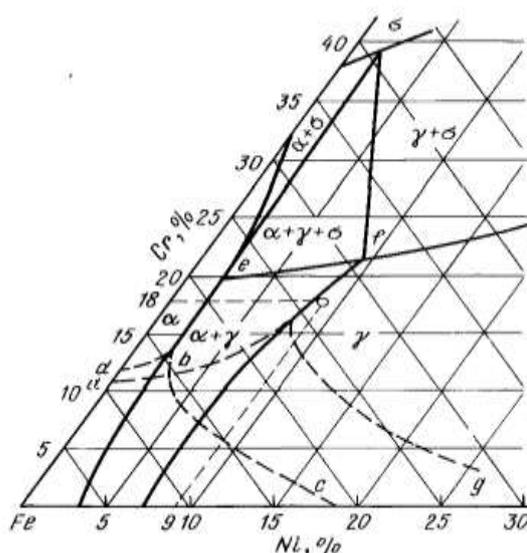


Рисунок 1.2 – Железный угол системы Fe-Cr-Ni. Сплошные линии – изотермический разрез при 650 °С [11]

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 °С, 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 [11].

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 – в два раза слабее хрома.

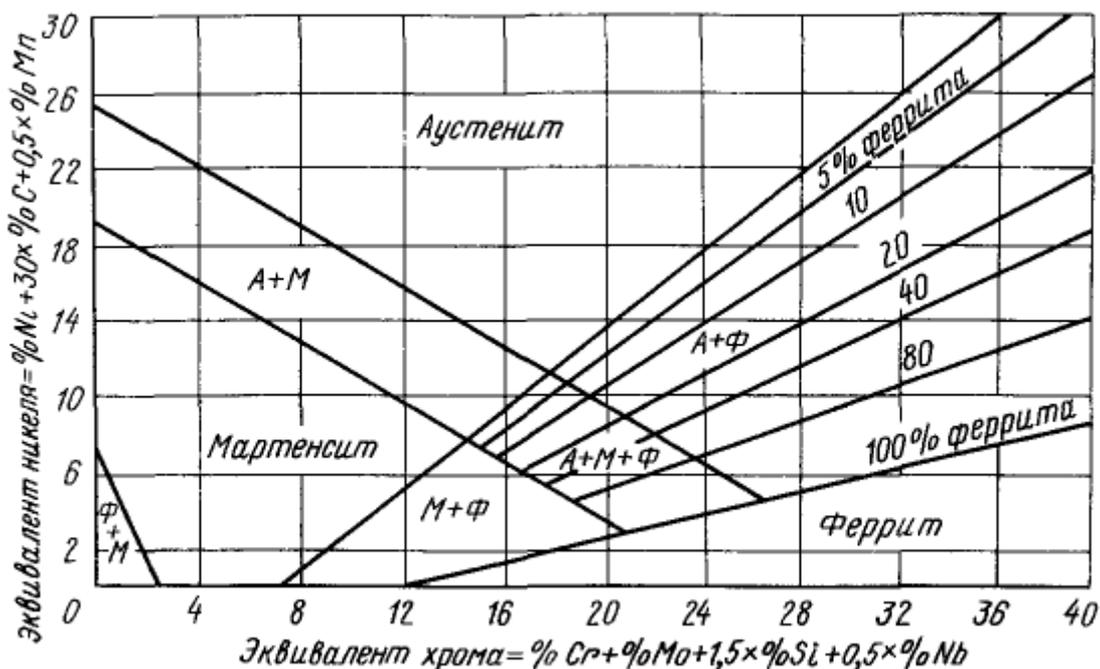


Рисунок 1.3 – Структурная диаграмма нержавеющей сталей [11]

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 1.3–Механические свойства [11]

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 1.4–Физические свойства [11]

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 Мн должна быть около 0 °С); отпуск при 450 – 500 °С повышает прочность за счет дисперсного твердения, происходящего главным образом в  $\alpha$ -фазе [11].

#### **1.4 Деформационное упрочнение аустенита**

Кроме методов термического упрочнения для повышения прочности аустенитных сталей широко применяется пластическая деформация. Влияние пластической деформации на изменение прочностных характеристик зависит как от степени пластической деформации так, от скорости деформации и вида нагружения. При квазистатическом нагружении материала упрочнение и разрушение происходят по механизмам отличным чем при динамическом нагружении, особенно при высокой скорости деформации.

При небольших деформациях (до 10%) образуются скопления и клубки дислокаций. Скопления дислокаций являются плоскими только в тех сталях, в которых достаточно низкая энергия дефектов упаковки. При увеличении степени деформации расстояние между отдельными группами дислокаций уменьшается и начинает формироваться ячеистая структура. Она представляет собой чередующиеся области с высокой и низкой плотностью дислокаций. Формирование ячеистой структуры происходит тем раньше, чем выше энергия дефектов упаковки аустенита. В результате роста плотности дислокаций наблюдается монотонное увеличение предела текучести и предела прочности, и уменьшение пластичности аустенитной стали [5].

При дальнейшем увеличении степени пластической деформации (свыше 30%) распределение ячеек по размерам сужается, а сами ячейки измельчаются. Толщина субраниц ячеек уменьшается, а плотность дислокаций внутри субраниц увеличивается вместе со средней по объёму плотностью дислокации.

При пластической деформации железомарганцевый аустенит упрочняется сильнее, чем железоникелевый. Это обусловлено тем, что последний имеет более высокую энергию дефектов упаковки. Чем ниже эта энергия, тем меньше склонность расщеплённых дислокаций к поперечному скольжению [8, 30, 31].

Нагрев деформированной стали приводит к снижению плотности дислокаций. Температура, при которой наблюдается разупрочнение стали, сильно зависит от легирования аустенита, особенно такими элементами, как молибден, вольфрам, хром, и заметно различается для сталей. Уменьшение прочности сопровождается повышением пластических свойств. Тёплая деформация (при температурах выше комнатной, но ниже температуры рекристаллизации), по сравнению с холодной деформацией (при комнатной температуре и более низких), позволяет получать в сталях меньшие прочностные свойства, но более высокие пластические. Поэтому операции отжига деформированного аустенита и тёплая деформация эквивалентны с точки зрения изменения механических свойств.

В метастабильных сталях, упрочнённых термомеханической обработкой (ТМО), при пластической деформации развивается мартенситное превращение  $\gamma \rightarrow (\epsilon, \alpha)$  [12, 27-29, 32]. Для сталей, обладающих интенсивной кинетикой превращения, необходимо проводить ТМО таким образом, чтобы стабилизировать аустенит. Стабилизировать аустенит необходимо до такой степени, чтобы получить оптимальную скорость мартенситного превращения. Данная стабилизация достигается в результате формирования ячеистой структуры, закрепления дислокаций примесными атомами, наиболее полного растворения легирующих элементов в аустените. Для стабильных материалов и для сталей с вялой кинетикой мартенситного превращения необходима дестабилизация аустенита в процессе ТМО за счёт обеднения твёрдого раствора легирующими элементами. В этом случае дестабилизация твёрдого раствора позволяет получить оптимальную кинетику мартенситного превращения, обеспечивающую высокие пластические свойства. Более широкие возможности

изменения механических свойств аустенита открываются при использовании таких сталей, в которых в результате старения происходит значительное упрочнение аустенита и при этом в 1.5-2 раза повышается предел текучести. Применение таких сталей позволяет разработать принципиально новые схемы комбинированного упрочнения, включающие старение и пластическую деформацию [6, 23-29].

Известны комбинированные схемы обработки аустенитных сталей [4]:

пластическая деформация (30%) с последующим старением (ДС);

старение с последующей пластической деформацией (30%) при температуре старения (СД);

старение при 873 К плюс пластическая деформация (30%) при температуре старения плюс старение при 923К (СДС);

высокотемпературная термомеханическая обработка (прокатка при 1373...1073К на 30%) с последующим старением.

В метастабильных аустенитных сталях последовательность операций пластической деформации и старения имеет важное значение для получения высокого комплекса прочностных и пластических свойств. Схема упрочнения ДС оказывается хуже, чем СД, поскольку в последнем случае можно получить одновременно более высокий уровень предела текучести, относительного удлинения и относительного сужения. Повышение предела текучести обусловлено, в основном, более высокой плотностью дислокаций из-за резкого сокращения времени пребывания упрочнённого аустенита при высоких температурах. Улучшение пластических характеристик обусловлено сильным стабилизирующим влиянием пластической деформации на состаренный аустенит и уменьшением интерметаллидной фазы, выделяющейся по границам зёрен, поскольку время нахождения деформированного аустенита при температуре распада твёрдого раствора незначительно. Поэтому ускоряющее влияние пластической деформации на выделение интерметаллидной фазы по границам зёрен отсутствует [4].

Совмещение процессов распада твёрдого раствора и пластической деформации (схема СД) является не только эффективным способом упрочнения, но и позволяет получить качественный новый комплекс механических свойства, который невозможно получить при отдельном применении старения и деформации.

### **1.5 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 [13]. 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 [13]. 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 [13].

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 [13] 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 [13].

Все эти исследования стали Гадфильда с относительно высоким содержанием марганца (13 – 30 % Mn) привели к высокой пластичности стали за счет развития двойникового или ТВИП – эффекта [13]. 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> [12]. 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 [13].

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 [13]. 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 [13]. Это известно как ТВИП – эффект, который запускается при низких или средних значениях энергии дефектов упаковки ( $12 - 35 \text{ МДж/м}^2$ ) [13]. 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 [14].

Вышеупомянутые исключительные механические характеристики ТВИП – стали отмечаются в различных исследованиях, которые посвящены механическим свойствам при растяжении, поведению деформации и соответствующим микромеханизмам, усталости, влиянию легирующих элементов и разрушению 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. Несмотря на это, Вэн и др. и Токер и др. [13] 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 [13]. При повышенных температурах деформация осуществляется за счет скольжения и двойникования, а при понижении температуры преобладает процесс формирования нанодвойников.

## **1.6 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 [13]. Два типа мартенсита могут образовывать 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 [13]. Последовательность

трансформации можно представить как  $\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha'$  [13]. С другой стороны, прямая трансформация аустенита в  $\alpha'$ – мартенсит ( $\gamma \rightarrow \alpha'$ ) также наблюдается [13]. 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 [13].

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 [13]. 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 [13]. Недавние исследования [13] 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 [13].

Многочисленные исследования показали благотворное влияние дробеструйной обработки на аустенитные нержавеющие стали [13], описывая роль остаточных напряжений на усталостную долговечность. Тем не менее, существует мало информации, связанной с метастабильными аустенитными нержавеющими марками. Клебер и др. [13] 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 [13], дисперсионные сплавы до 50 нм [13] и сплавы на основе твердых растворов до 26 нм [13].

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 отожженных 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.

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

Технологии производства слоев переходят от быстрого прототипирования и быстрой обработки к быстрому производству. Производство деталей для конечного использования из металла является одним из наиболее перспективных применений для этих методов. Быстрое изготовление металлических деталей особенно подходит для изготовления небольшого количества деталей и массовой настройки. Прямое изготовление металлических изделий с высокой плотностью и превосходными механическими свойствами возможно при использовании технологий изготовления слоев на основе лазера. Авиационная, автомобильная и медицинская промышленность являются основными рынками сбыта. Появление новых станков, оснащенных волоконными и дисковыми лазерами, должно повысить точность и механические свойства обрабатываемых деталей.

Привлекательность использования компонентов, изготовленных с применением добавок, для применения заключается в возможности изготавливать детали сложной формы, которые невозможно изготовить только с помощью процедур литья или вычитания. На практике компонент с аддитивным производством обычно требует некоторой умеренной вычитающей обработки по причинам, связанным с чистотой поверхности или размерами. Тем не менее, большая часть компонента будет произведена АМ. При такой сложности в топологии деталей условия (например, энергия лазера, структура сборки, скорость охлаждения) при производстве материала в разных местах внутри

компонента могут сильно различаться. С этими различными условиями появляется возможность того, что характеристики и свойства материала также будут сильно различаться в пределах одного производимого компонента. Это может означать, что размер «сварного шва», размер зерна и морфология могут изменяться в зависимости от положения внутри детали. Это показано на микрофотографиях, приведенных на рис. 1. Кроме того, исходное состояние дислокации материала также может быть переменным. Тогда для конструктивных применений сопротивление пластическому течению материала может существенно варьироваться ( $> 10\%$ ) в разных местах детали. Было продемонстрировано, что в этих частях после охлаждения возникает остаточное внутреннее напряженное состояние. Это верно, как для масштаба детали, так и для масштаба микроструктуры. Это внутреннее напряженное состояние может также потенциально изменяться в пространстве. Для традиционно изготавливаемых материалов монокристалл был основной микроструктурной составляющей, которая определяла изменчивость напряженного состояния и реакцию материала на повреждение. Для материалов АМ монокристалл остается существенной структурной особенностью материала, однако в настоящее время существуют сварные швы АМ, которые добавляют дополнительную шкалу морфологической длины к микроструктуре материала. Что касается внутренних границ материала, то следует учитывать не только границы зерен, но и межполосные области или границы раздела, которые еще недостаточно изучены и подвержены той же изменчивости из-за изменяющихся условий процесса.

Посредством термообработки после обработки может быть возможно смягчить эти пространственные изменения для некоторых компонентов, однако при остаточном внутреннем напряжении существует возможность также изменить размеры детали после нагревания и повторного охлаждения. Хотя мы явно не учитываем возможное влияние остаточного внутреннего напряжения в наших результатах, мы рассматриваем его потенциальное влияние в обсуждении.

Влияние размера зерна на сопротивление пластической текучести хорошо известно, но этот опыт основан на традиционно изготовленном материале. Хорошо известное эмпирически основанное выражение Холла-Петча для характеристики взаимосвязи между средним размером зерна и напряжением потока материала основано на материале традиционной структуры. Наше понимание влияния границы зерна на механическое поведение еще недостаточно для того, чтобы обобщить влияние размера зерна на пластическое сопротивление потока материалов сильно отличающихся структур, таких как АМ, производит. Также стало ясно, что процессы АМ создают состояния дислокационной структуры, которые сильно отличаются от отожженного состояния. Результат этой структуры проявляется в значительно большем сопротивлении пластической текучести для собранных материалов по сравнению с отожженным материалом. Кроме того, каждое технологическое условие имеет потенциал для производства материала с различной исходной структурой и, следовательно, существенно отличающимся механическим поведением. Строительные сплавы также вводят возможность легирования изменчивости химии, или дизайн или случайно. Наконец, каждую данную систему АМ можно использовать для создания компонентов с различным составом сплава Эта возможность также дает возможность для непреднамеренных химических элементов проникать в данный компонент и создавать примеси в процессе сборки

В исследовании [14] была предложена модель монокристалла, чтобы с точностью до первого порядка представить физические характеристики, предположительно отличающиеся между изготовленной нержавеющей сталью АМ 304L и тем же материалом, что и традиционная деформируемая обработка и термообработанный материал АМ. Было показано, что эти различия в конструктивных особенностях описывают значительную часть разницы напряжений потока в 1,7 раза между собранным материалом АМ и двумя другими материалами. Начальная дислокационная плотность в 2,5 раза выше в случае сборочного материала по сравнению с деформируемым материалом объясняет большую часть разности напряжений потока. Было показано, что

влияние размера зерна относительно невелико, однако значительная изменчивость коэффициента Холла-Петча наблюдалась на основании литературных данных для нержавеющей стали 304L, изготовленной традиционными способами. Существует также неопределенность в использовании простого представления Холла-Петча размера зерна из-за сложной топологии зерен в собранном материале АМ. Был предложен анализ неопределенности на основе возможной изменчивости в нашем понимании как размера зерна, так и начальной плотности дислокаций. Этот простой анализ показывает, что требуется больше работы для разработки надлежащих моделей для класса готовых материалов АМ, чтобы обеспечить более быструю сертификацию для структурных применений.

### **1.8 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 [15]. Эти стали содержат стабилизирующие аустенит элементы, такие как Mn, Ni и N, которые при добавлении в достаточных концентрациях сохраняют аустенитную фазу при комнатной температуре [15]. Однако она может превращаться в мартенсит во время холодной обработки. Эти свойства обусловлены деформационно – индуцированным мартенситным превращением.

Метастабильные аустенитные нержавеющей стали подвергаются фазовому превращению от  $\gamma$  – аустенита до  $\epsilon$  – и  $\alpha'$  – мартенситов [15]. 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 [15].

В [15] представлены экспериментальные результаты, показывающие зависимость между твердостью и кристаллографической ориентацией отдельных зерен аустенита, с целью обеспечения микромеханического понимания механического поведения метастабильных аустенитных нержавеющей 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 [15] 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 [15]. 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.

## **1.9 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.

Динамические характеристики деформации сдвига и характеристики разрушения соединения сваркой в дуговой сварке дуговой сваркой (SMAW) из нержавеющей стали 316L экспериментально изучены с точки зрения взаимосвязи между механическими свойствами и скоростью деформации.

Тонкостенные трубчатые образцы деформируются при комнатной температуре при скоростях деформации в диапазоне от  $8 \times 10^2$  до  $2,8 \times 10^3$  с<sup>-1</sup> с использованием крутильного стержня Хопкинсона. Результаты показывают, что скорость деформации оказывает существенное влияние на механические свойства и реакцию разрушения испытанных соединений SMAW. Обнаружено, что напряжение потока, общая деформация сдвига до разрушения, скорость упрочнения при работе и чувствительность к скорости деформации увеличиваются с увеличением скорости деформации, но объем активации уменьшается. Наблюдаемое динамическое поведение деформации сдвига моделируется с использованием конститутивного закона Кобаяси-Додда, и показано, что предсказанные результаты находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными. Фрактографический анализ с использованием сканирующей электронной микроскопии показывает, что все испытанные образцы разрушаются в пределах своих зон слияния и что механизм первичного разрушения является одним из обширных локальных сдвигов. Поверхности разрушения характеризуются наличием множества ямочек. Более высокая скорость деформации имеет тенденцию уменьшать размер ямочек и увеличивать их плотность. Наблюдаемые особенности разрушения тесно связаны с предшествующим поведением потока [16].

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) [17,18]. Возможно и комбинированное применение ИПД для получения УМЗ и наноструктурированных материалов [17].

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 [17] 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 [17].

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 [18].

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.

Легирующие 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 [18]. 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 [18].

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 [18, 19]. 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 [19].

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 [20].

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 [21] 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 [21].

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 наплавки, 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  $106 \text{ с}^{-1}$  получали с помощью метания пластины под влиянием на неё высокого давления  $50 \text{ МПа}$  и взрывной волны, результаты сравнивали со статически деформированной пластиной со скоростью деформации  $102 \text{ с}^{-1}$  на  $500$  – тонном прессе.

Увеличение пикового давления ударной волны приводит к существенному повышению прочностных характеристик стали  $110\text{Г}13\text{Л}$ . 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 [22, 23]. В то время как при статическом сжатии следы скольжения проявляются в макроскопических пачках толщиной  $20 - 30 \text{ мкм}$ . Отдельные микродвойники хорошо видны на фоне ячеистой дислокационной структуры после ударного воздействия при  $8 \text{ МПа}$ . 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 [22].

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 [22]. 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 [24] установлено, что в сильнодеформированных зонах количество  $\alpha$  – фазы резко возрастает, что делает эту зону более прочной относительно остального объёма упрочнённого металла.

Высокоскоростная деформация материалов (106 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 [25 – 27].

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 [28,29].

Исследователи в [30] 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 107 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 [30].

Эффект упрочнения металлов электронным пучком гораздо большей энергии (МэВ) изучался в [25 – 27]. 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 [25]. 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 [25].

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 [25, 26].

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  $\sim 10^3 - 10^4$  с<sup>-1</sup> механизм деформации изменяется с термически активируемого дислокационного скольжения, проявляющегося при медленном нагружении, на нестабильное пластическое течение, обусловленное ускоренной генерацией дислокаций при деформациях больше  $10^4$  с<sup>-1</sup> [27].

Итак, действие сильноточных 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.

### **1.10 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> [31,32].

По общим физическим признакам все источники генерации КПЭ можно классифицировать на следующие виды (рисунок 1.4) [32]. 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 1.4 – Классификация видов КПЭ [31]

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

### 1.11 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 объеме материала. Это приводит как к объемному упрочнению, так и к тыльному отколу мишени [26].

Сильноточные электронные пучки являются источниками высокоскоростной деформации ( $\epsilon \sim 10^6 \text{ с}^{-1}$ ), которая является причиной смены механизма деформации и разрушения ГЦК металлов [33]. 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 МЗС [26]. Для стали 304L облучение МЭП формирует неоднородное упрочнение по толщине мишени и откольное разрушение тыльной ее части при толщине образца меньше 8 мм. Однако такое динамическое нагружение может происходить многократно при толщинах мишени больше 8 мм без откольного разрушения и меньше 8 мм при условии, что до первого удара толщина была больше или равна 8мм и после формируется лунка на мишени, в которую многократно бьют электронные пучки. Реакция материала на такие воздействия остается открытой.

На основании вышеизложенного целью данной работы является исследование влияния многократного динамического нагружения образцов стали 304L при изменении схемы воздействия на эволюцию структуры материала по объему мишени.

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;
- 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. Материалы, оборудование и методы исследования

### 2.1 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 2.1. В некоторых аустенитных зернах присутствовали двойники закалки.

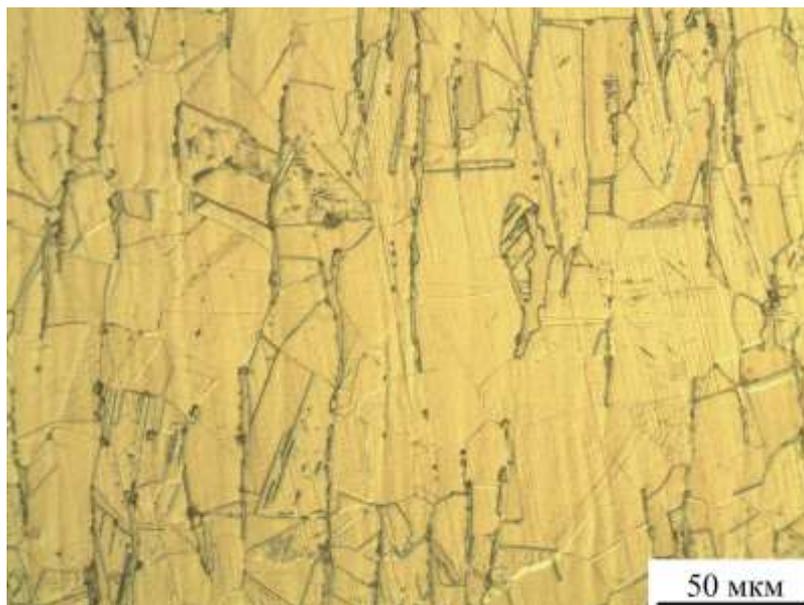


Рисунок 2.1 – Микроструктура исходных образцов стали 304L

### 2.2 Оборудование для динамического нагружения.

В качестве генератора ударных волн использовали электронный ускоритель «СИНУС – 7».



Рисунок 2.2 – 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 %. Толщины мишеней из стали 304L были равны 8 мм. 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.

Мишени толщиной 8 мм (№LP-13, №LP-14 и №LP-19) были облучены тремя импульсами нагружения. В качестве образца-свидетеля для дальнейших исследований микроструктуры и микротвердости оставался образец №LP-19.

У образцов №LP-13 и №LP-14 после облучения была проточена (удалена) лунка абляции до толщины образцов 5,1 мм. Далее образец №LP-13 нагружался однократным импульсом со стороны бывшей лунки абляции (прямое нагружение), а образец №LP-14 нагружался с тыльной стороны (обратное нагружение).

### **2.3 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:  $\text{HNO}_3$  (1 об. часть) и  $\text{HCl}$  (3 об. части). 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 Результаты и обсуждения

Три мишени толщиной 8 мм были облучены тремя импульсами нагружения каждая. В качестве образца-свидетеля для дальнейших исследований микроструктуры и микротвердости оставался образец №LP-19. Схема нагружения тремя импульсами нагружения представлена на рисунке 3.1. Внешний вид образца после нагружения представлен на рисунке 3.2 а.

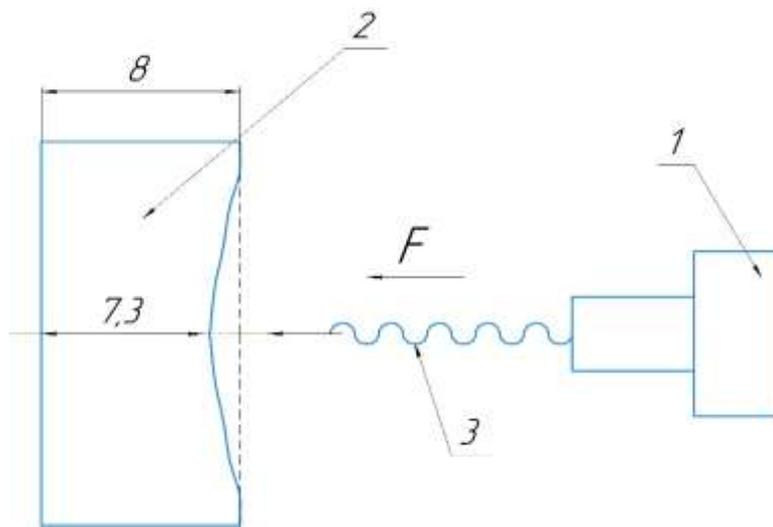


Рисунок 3.1 - Схема нагружения образца толщиной 8 мм одним импульсом; 1 – источник МЭП, 2 – образец-мишень, 3 – МЭП



а

б

в

Рисунок 3.2 – Внешний вид образцов после нагружения МЭП; а – образец №LP-19 после трехкратного нагружения мишени толщиной 8 мм, б – образец №LP-14 (обратное нагружение), в – образец №LP-13 (прямое нагружение)

Глубина лунки абляции после трехкратного нагружения не превышает 2...2,2 мм. Следовательно, за каждый импульс нагружения лунка по глубине увеличивалась на 0,7 мм.

На рисунке 3.3 представлен профиль микротвердости по толщине мишени после первого нагружения тремя импульсами МЭП. Анализ полученных данных позволяет выделить на образце по его толщине три зоны: фронт I, где микротвердость достигает максимальных значений ~2100 МПа, центр, где микротвердость имеет большой разброс, и ее средняя величина составляет 1600 МПа, и тыл с величиной микротвердости ~1800 МПа.

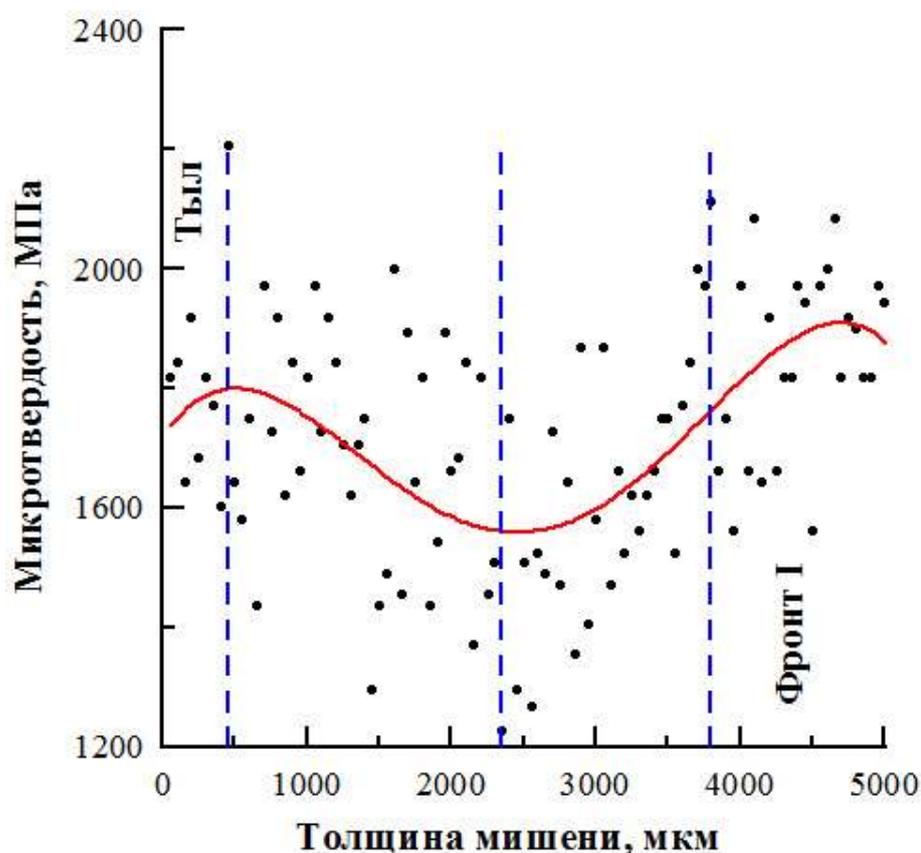


Рисунок 3.3 – Профиль микротвердости по толщине мишени после трехкратного нагружения исходного образца толщиной 8 мм МЭП

Большой разброс значений микротвердости во всех зонах связан с разной степенью вовлечения в процесс двойникования кристаллитов. Как видно из рисунка 3.4, только примерно в половине зерен развивается активное

двойникование, причем в ряде зерен в двух системах. Остальные зерна мало подвержены пластической деформации, либо она полностью отсутствует.

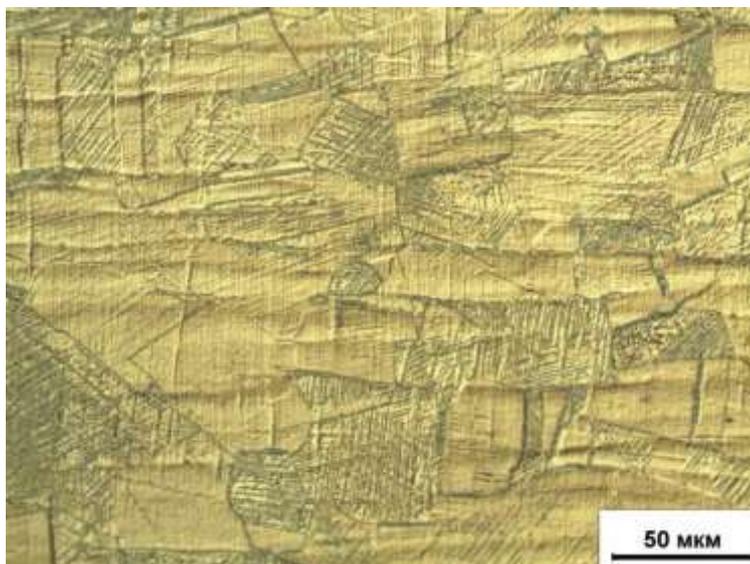


Рисунок 3.4 – Микроструктура фронтальной части мишени после трехкратного нагружения МЭП

Для дальнейших исследований образцы №LP-13 и №LP-14 после трехкратного нагружения протачивались до толщины 5.1 мм со стороны лунки абляции. В результате проточки удалялась полностью лунка абляции и зона теплового влияния под ней.

Далее образец №LP-13 нагружался однократным импульсом МЭП со стороны бывшей лунки абляции (прямое нагружение, фронт II). Внешний вид образца после нагружения представлен на рис. 3.2 в. С тыльной стороны мишени сформировался тыльный откол без разрушения откольного пузыря. На рис. 3.5 представлен профиль микротвердости по толщине мишени. Видно, что с фронта (фронт I, II) и тыла мишени уровень микротвердости достигает ~2800 МПа. В центре образца средний уровень микротвердости достигает ~2100 МПа. Разброс твердости менее значителен по сравнению с образцом №LP-19, рис. 3.3. Это подтверждается и анализом микроструктуры, рис. 3.6. Видно, что число зерен, подвергнутых двойникованию в центральной части мишени, составляет ~70%.

Следовательно, уже после повторного однократного нагружения мишени наблюдается более интенсивное вовлечение кристаллитов в пластическую деформацию и средний уровень микротвердости по всей толщине образца увеличивается.

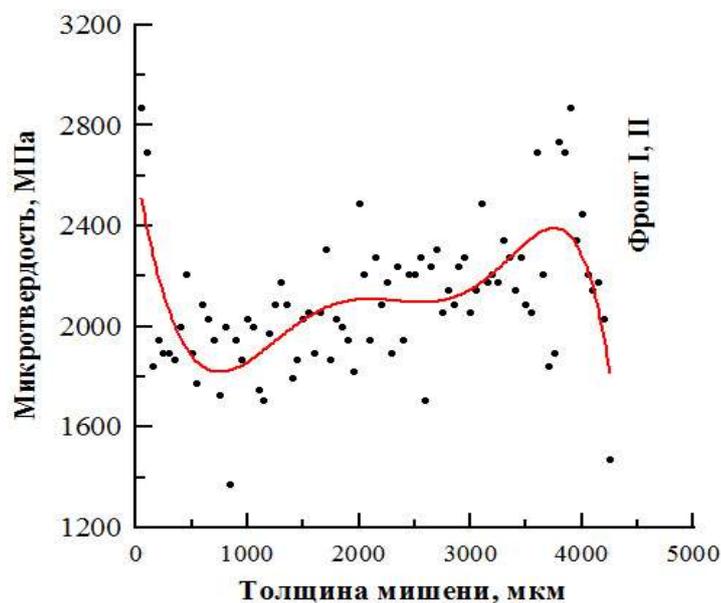


Рисунок 3.5 – Профиль микротвердости по толщине мишени после повторного нагружения одним импульсом МЭП образца №LP-13 (прямое нагружение, фронт I,II)

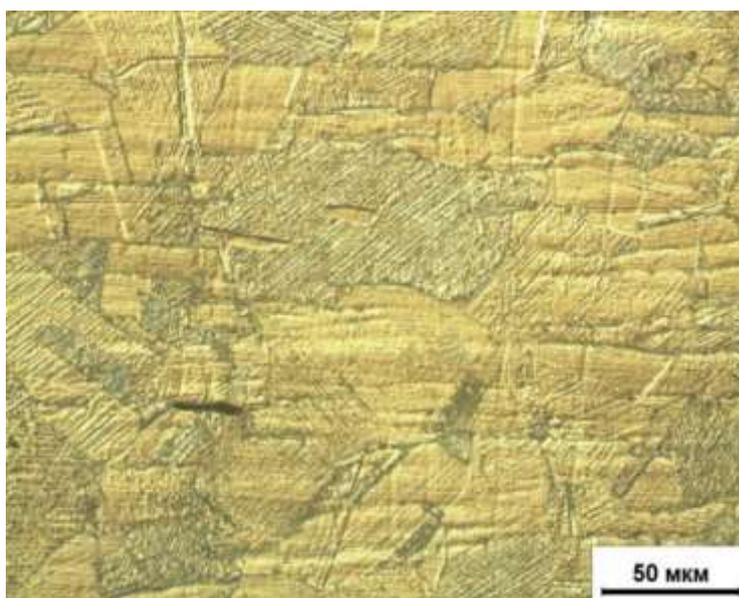


Рисунок 3.6 – Микроструктура центральной части мишени после повторного нагружения одним импульсом МЭП образца №LP-13 (прямое нагружение, фронт I,II)

Образец №LP-14 после повторного нагружения одним импульсом со стороны тыла (обратное нагружение) представлен на рис. 3.2 б. Видно, что откольный импульс привел к формированию тыльного откола и разрушения откольного пузыря.

Микротвердость по всей толщине образца практически выровнялась, и ее средний уровень достиг 2400 МПа, рис. 3.7. Только непосредственно у поверхностей первоначального трехкратного прямого нагружения (фронт I) и повторного однократного обратного нагружения (фронт II) наблюдается понижение микротвердости связанное и тепловым воздействием МЭП.

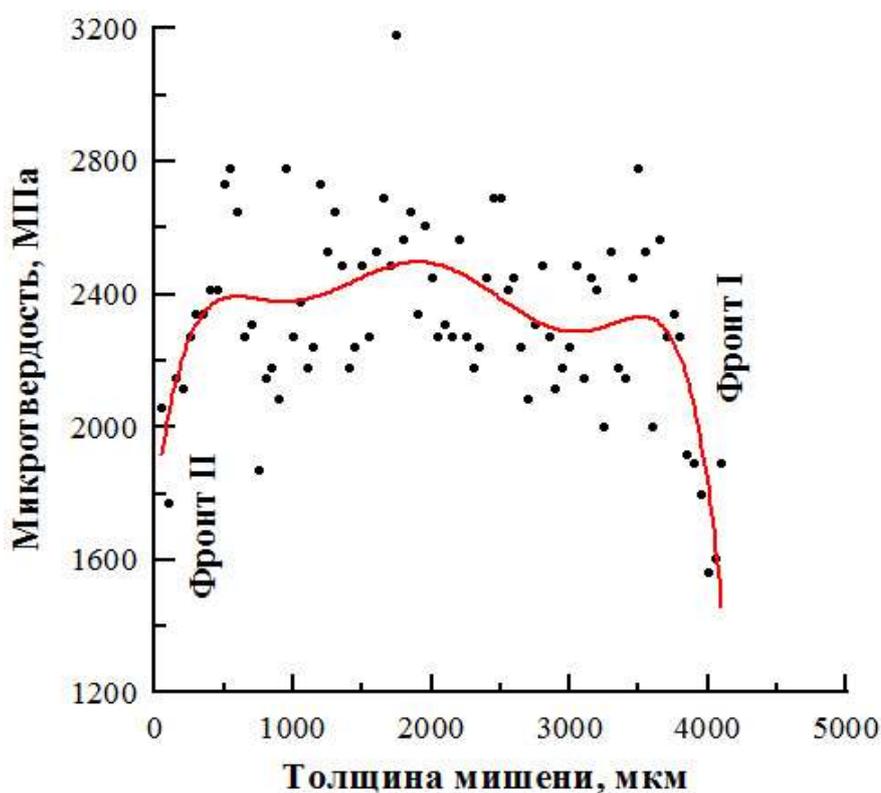


Рисунок 3.7 – Профиль микротвердости по толщине мишени после повторного нагружения одним импульсом МЭП образца №LP-14 (обратное нагружение, фронт I,II)

Анализ микроструктуры (рис. 3.8) позволяет утверждать, что практически весь материал подвергается пластической деформации. Интенсивность пластического течения в разных зернах не одинакова. Это связано с влиянием ориентации зерен по отношению к ударной волне.

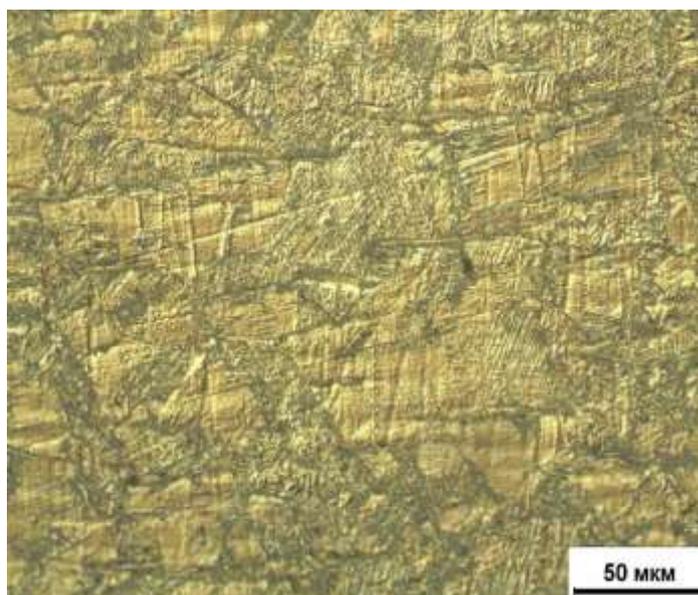
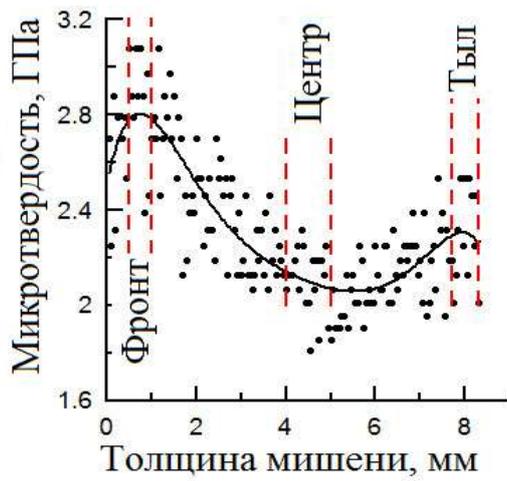
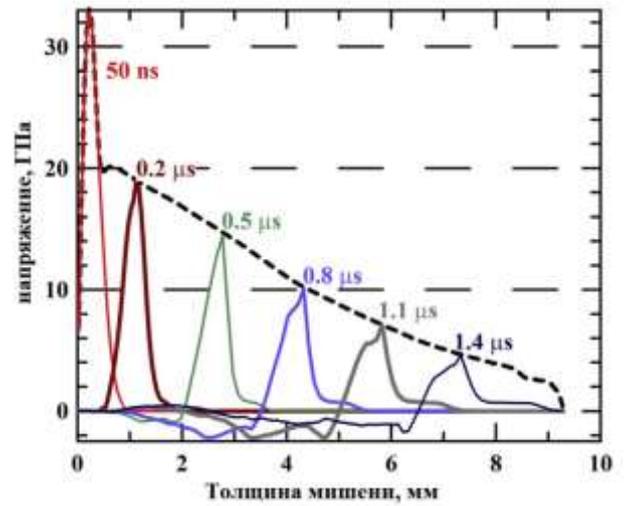


Рисунок 3.8 – Микроструктура фронтальной (фронт II) части мишени после повторного нагружения одним импульсом МЭП образца №LP-14 (обратное нагружение, фронт I,II)

Таким образом, однократное повторное ударно-волновое нагружение стали 304L приводит к объемному упрочнению. Профиль микротвердости по глубине, имеет максимум, расположенный с глубины  $\sim 0.5$  мм от дна лунки абляции (рисунок 3.7), где согласно расчетам для стали типа 304L ударная волна 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 ( $\sim 2.8$  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, рис. 3.9 [34, 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.



а



б

Рисунок 3.9 - 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 [35]

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

### **4.1 Предпроектный анализ**

На сегодняшний день с развитием науки, непосредственно развиваются и все отрасли промышленности. Конкуренция технологий и разработок, внедряются и замещают устаревшую продукцию с рынка. Внедрение новой технологии происходит тем больше, чем больше надежность 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 при изменении схемы воздействия на эволюцию структуры материала по объему мишени. 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 индустриальных, 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 [38].

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.

## **4.2 Fast – анализ**

FAST – анализ состоит из шести стадий:

Выбор объекта FAST – анализа;

Описание главной, основных и вспомогательных функций, выполняемых объектом;

Определение значимости выполняемых функций объектом;

Анализ стоимости функций выполняемых объектом исследования;

Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ;

Оптимизация функций выполняемых объектом.

### **4.2.1. Выбор объекта FAST – анализа.**

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

### **4.2.2 Описание главных, основных и вспомогательных функций, выполняемых объектом**

Главной функцией (назначением) стали 304L является надёжность и долговечность в условиях различного вида нагружения, агрессивных сред в интервал 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 отрицательно влияет на геометрию сварного шва.

#### 4.2.3 Определение значимости выполняемых функций объектом

Таблица 4.1 – Матрица смежности

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

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

После определения более значимых функций нужно определить количественное соотношение функций.

Преобразовываем матрицы смежности в матрицы количественных соотношений функций.

Таблица 4.2 – Матрица количественных соотношений функций

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

#### 4.2.4 Определение значимости функций

Согласно матрице количественных соотношений получили следующие относительные значимости функций: жаропрочность/ жаростойкость и механическая обработка – 0,3125 (5/16), свариваемость – 0,21875, диамagne-тизм – 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).

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.

## **4.2.5 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.

## **4.3 SWOT – анализ**

Во-первых, научное исследование является фундаментальным, на сегодняшний день, согласно обзору литературных источников, мало работ, занимающихся исследованием влияния сильноточных 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 некоей 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 4.3– SWOT – анализ

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

#### 4.4 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 4.4.

Таблица 4.4 – 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
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
----	---	---	---

Продолжение таблицы 4.4

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>	<b>55</b>	<b>54</b>

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.

#### **4.5 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.

#### **4.6 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 [39].

Устав проекта документирует бизнес-потребности, текущее понимание потребностей заказчика проекта, а также новый продукт, услугу или результат, который планируется создать [39].

Устав научного проекта магистерской диссертации имеет структуру, представленную ниже [39].

1) Цели и результат проекта. Информация по заинтересованным сторонам проекта представлена в таблице 4.5.

Таблица 4.5– 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.

В таблице 4.6 представлена информация о иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Таблица 4.6 – 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 4.7).

Таблица 11 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции
11	Гнюсов С.Ф., д.т.н., профессор ИШНКБ ТПУ	Руководитель	Отвечает за реализацию, координирует деятельность участников проекта
22	Барский Н.А., 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 4.7 – 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	30.05.2020 г.
3.2.2. Дата завершения проекта	
3.3. Прочие ограничения и допущения	Ограничения по использованию установки «СИНУС – 7»

## 4.7 Планирование управления проектом

### 4.7.1 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 4.8 – 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.

## 4.7.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Для определения ожидаемого значения трудоемкости используем формулу

$$t_{\text{оти}} = \frac{3t_{\text{мини}} + 2t_{\text{макси}}}{5} \quad (2)$$

где  $t_{\text{оти}}$  – ожидаем трудоемкость выполненной  $i$ -й работы чел. - день.

$t_{\text{мини}}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -го работы (оптическая оценка в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел. – дн.

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

После того, как рассчитали  $t_{\text{оти}}$ , рассчитывается продолжительность каждой работы в рабочих днях:

$$T_{\text{pi}} = \frac{t_{\text{оти}}}{\text{Ч}_i} \quad (3)$$

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

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

Составление предварительного плана ВКР:

$t_{\text{макси}}=3$  дня;  $t_{\text{мини}}=1$  день.

$$t_{\text{ожи}} = \frac{3t_{\text{мини}} + 2t_{\text{макси}}}{5} = \frac{3 + 6}{5} = 1,5 \text{ дня};$$

$$T_{\text{pi}} = \frac{t_{\text{оти}}}{\text{Ч}_i} = \frac{1,4}{1} = 1,4 \sim 2 \text{ дня};$$

Подбор и первоначальное ознакомление с литературой по теме ВКР:

$t_{\text{макси}}=14$  дней;  $t_{\text{мини}}=7$  дней.

$$t_{\text{ожи}} = \frac{3t_{\text{мини}} + 2t_{\text{макси}}}{5} = \frac{21 + 28}{5} = 9,8 \text{ дня};$$

$$T_{\text{pi}} = \frac{t_{\text{оти}}}{\text{Ч}_i} = \frac{9,8}{2} = 4,9 \sim 5 \text{ дня};$$

Изучение и выбор метода исследований в ВКР:

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

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{mini}} + 2t_{\text{maxi}}}{5} = \frac{30 + 28}{5} = 11,6 \text{ дня;}$$

$$T_{\text{pi}} = \frac{t_{\text{oti}}}{\text{Ч}_i} = \frac{11,6}{2} = 5,8 \sim 6 \text{ дня;}$$

Написание теоретической части ВКР:

$t_{\max i} = 21$  день  $t_{\min i} = 14$  дней.

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{mini}} + 2t_{\text{maxi}}}{5} = \frac{42 + 42}{5} = 16,8 \text{ дня;}$$

$$T_{\text{pi}} = \frac{t_{\text{oti}}}{\text{Ч}_i} = \frac{16,8}{1} = 16,8 \sim 17 \text{ дней;}$$

Подбор оборудования и заготовок для проведения эксперимента

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

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{mini}} + 2t_{\text{maxi}}}{5} = \frac{21 + 24}{5} = 9 \text{ дней;}$$

$$T_{\text{pi}} = \frac{t_{\text{oti}}}{\text{Ч}_i} = \frac{9}{2} = 4,5 \sim 5 \text{ дней;}$$

Получение результатов исследования и создание базы данных исследования

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

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{mini}} + 2t_{\text{maxi}}}{5} = \frac{21 + 28}{5} = 9,8 \text{ дней;}$$

$$T_{\text{pi}} = \frac{t_{\text{oti}}}{\text{Ч}_i} = \frac{9,8}{1} = 9,8 \sim 10 \text{ дней;}$$

Анализ базы исследования/полученных результатов

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

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{mini}} + 2t_{\text{maxi}}}{5} = \frac{21 + 42}{5} = 29,4 \text{ дня;}$$

$$T_{\text{pi}} = \frac{t_{\text{oti}}}{\text{Ч}_i} = \frac{29,4}{2} = 14,7 \sim 15 \text{ дней}$$

### 4.7.3 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:

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

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:

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

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

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

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

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 104 - 14}$$

Все рассчитанные значения вносим в таблицу 14, после заполнения таблицы построим календарный план-график (таблица 4.4.1).

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 4.9 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$		Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$	
	tmin, чел-дни		tmax, чел-дни		$t_{ожi}$ , чел-дни		Руководитель	Инж	Руководитель	Инж
	Руководитель	Инж	Руководитель	Инж	Руководитель	Инж	Руководитель	Инж	Руководитель	Инж
ДОТДОТТ										
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 4.10 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№ работ	Вид работ	Исполнители	Ткi, кол. 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															



#### **4.8 Бюджет научного исследования. Затраты на материалы и эксперименты**

Затраты на проведение научного исследования приведены в таблице 4.11

Большие затраты потребовались для проведения испытаний на электронном ускорителе, также довольно затратное обошлись услуги растровой электронной микроскопии РЭМ, которая необходима была для проведения исследования[40].

Стоимость оборудования, используемого при выполнении НИР, имеющегося на кафедре отделения химической инженерии стоимостью свыше 40 тыс. рублей, учитывалось в виде амортизационных отчислений. В данном случае выбран линейный способ амортизации оборудования, при котором происходит равномерное начисление амортизации с первоначальной до остаточной стоимости (в конце срока службы) в течение всего срока использования. Текущая остаточная стоимость определяется вычитанием суммарной накопленной амортизации основного средства из первоначальной стоимости.

Формула амортизации оборудования для определения ежемесячной суммы (М):

$$\sum M = ПС * n, \quad (5)$$

где ПС – первоначальная стоимость оборудования;

n – ежемесячная норма амортизации, рассчитываемая как отношение 1 к сроку полезного использования, выраженному в месяцах.

$$1200000 \text{ рублей} / (8 \text{ лет} * 12 \text{ мес.}) = 12500 \text{ рублей}$$

Итого на амортизацию оборудования будет затрачиваться 12500 рублей.

Расчет затрат по статье «Амортизация оборудования» представлена в таблице 11.

Таблица 4.11 - Расчет затрат по статье «Амортизация оборудования»

Наименование оборудования	Цена оборудования, руб.	Эксплуатации оборудования, количество лет	Амортизация, руб.
Растровый электронный микроскоп (РЭМ) <i>OLYMPUS GX51</i>	1200000	8	12500

Таблица 4.12– Затраты на сырье на проведение НИР

Наименование	Затраты, руб.
Материалы	1000
Алмазные пасты	1500
Установка «СИНУС -7»	60000
<b>Итого:</b>	<b>62500</b>

Приведена стоимость пользования установкой в течение одного рабочего дня. Эксперименты на ней проводились один день

#### 4.9 Расчет фонда заработной платы

Заработная плата определяется в соответствии с количеством отработанного времени по теме и установленным штатно-должностным окладом [36].

Для техника (дипломника) месячный оклад составляет  $Z_{бт}=13150$  руб/мес, для руководителя (профессора с ПКГ ППС 4) -  $Z_{бп}=33162$  руб/мес.

Заработная плата рассчитывается по формуле 6 [39]:

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

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

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ( $Z_{осн}$ ) руководителя (лаборанта, инженера) рассчитывается по следующей формуле [40]:

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

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

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

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

Средневзвешенную заработную плату можно рассчитать по формуле [40]:

$$Z_{дн} = Z_{м} / T \quad (8)$$

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

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

Месячный должностной оклад работника [37]:

$$Z_{м} = Z_{б} * k_{р}, \quad (9)$$

где  $Z_{б}$  – базовый оклад, руб.;

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

Теперь рассчитываем месячную заработную плату работников проекта:

$$Z_{мт} = 13150 \cdot 1.3 = 17095 \text{ руб.};$$

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

Определяем средневзвешенную заработную плату:

$$Z_{дн.т} = 17095 / 26 = 657,5 \text{ руб.};$$

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

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

$$Z_{осн.т} = 657,5 \cdot 100 = 65750 \text{ руб.};$$

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

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10–15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы [36]

$$\text{Здоп} = \text{кдоп} * \text{Зосн}, \quad (10)$$

где  $\text{Здоп}$  – дополнительная заработная плата, руб.;  $\text{кдоп}$  – коэффициент дополнительной зарплаты;  $\text{Зосн}$  – основная заработная плата, руб.

Принимаем коэффициент дополнительно зарплаты равным 0,1 и получаем:

$$\text{Здоп.т} = 0.1 * 65750 = 6575 \text{руб.};$$

$$\text{Здоп.п} = 0.1 * 165810 = 16581 \text{руб.};$$

Итак, определяем полную зарплату работников:

$$\text{Сзпт} = 65750 + 6575 = 72325 \text{руб.};$$

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

Также необходимо рассчитать отчисления во внебюджетные фонды (социальные нужды) по формуле 11 [42]:

$$\text{Свнеб} = \text{квнеб} * (\text{Зосн} + \text{Здоп}), \quad (11)$$

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

Принимаем  $\text{квнеб} = 0.302$ .

$$\text{Свнеб.т} = 0.302 * 72325 = 21842,15 \text{руб.};$$

$$\text{Свнеб.п} = 0.302 * 182391 = 55082,082 \text{руб.}$$

Накладные расходы примем не более 16% от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы.

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

$$\text{Снакл} = \text{кнакл} * (\text{Зосн} + \text{Здоп}), \quad (12)$$

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

$$\text{Снакл.т} = 0.16 * 231560 = 37049,6 \text{руб}$$

Результаты расчета фонда заработной платы представлены в таблице

#### 4.8.1

Таблица 4.13– Фонд заработной платы

Исполнитель	Число исполнителей	Трудоемкость выполнения работ Тисп,д	Заработная плата по тарифной ставке руб./мес.	Среднедневная заработная плата, руб	Основная заработная плата исполнителя ЗП осн,руб.	Месячный должностной оклад, руб
Дипломник (техник)	1	100	13150	657,5	65750	17095
Руководитель (профессор )	1	100	33162	1658.1	165810	43110.6
Итого:	2	200			231560	

Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта.

Таблица 4.14 - Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НТИ	62500
2. Затраты на амортизацию оборудования	12500
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	231560
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	23156
5. Отчисления на социальные нужды	36508,6
6. Накладные расходы	37049,6
7. Бюджет затрат НТИ	403274,2

Бюджет научного исследования, который включает материальные затраты, затраты по основной и дополнительной заработной плате, амортизацию оборудования и отчисления во внебюджетные фонды и накладные расходы и составил 403274,2 руб.

## 4.9 Определение ресурсной финансовой и бюджетной эффективности исследования

### 4.9.1 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 [39]:

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

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 4.15– 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 4.15 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 энергии 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 мегавольтового 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 403274,2 руб

## **1. Социальная ответственность**

В данном разделе рассмотрены вопросы, связанные с организацией рабочего места в соответствии с нормами производственной санитарии, техники производственной безопасности и охраны окружающей среды.

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.

Под проектированием рабочего места понимается целесообразное пространственное размещение в горизонтальной и вертикальной плоскостях функционально взаимосвязанных средств производства (оборудования, оснастки, предметов труда и др.), необходимых для осуществления трудового процесса.

При проектировании рабочих мест должны быть учтены освещенность, температура, влажность, давление, шум, наличие вредных веществ, электромагнитных полей и другие санитарно-гигиенические требования к организации рабочих мест.

При проектировании лаборатории необходимо уделить внимание и охране окружающей среды, а в частности, организации безотходного производства.

Также необходимо учитывать возможность чрезвычайных ситуаций. Так как лаборатория находится в городе Томске, наиболее типичной ЧС является мороз. Так же, в связи с неспокойной ситуацией в мире, одной из возможных ЧС может быть диверсия.

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 Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды**

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 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 [40], 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.

ПДУ для ЭМИ:

- при напряженности эл.маг. поля 10 мкРВт/см<sup>2</sup> – время контакта – 8 час;
- при 10-100 мкРВт/см<sup>2</sup> – не более 2 часов;
- при 100-1000 мкРВт/см<sup>2</sup> не более 20 минут;

Для населения – 1 мкРВт/см<sup>2</sup>

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 ЭМП так же является эффективной защитой.

К средствам защиты от статического электричества и электрических полей промышленной частоты относят комбинезоны, очки, спецобувь, заземляющие браслеты, заземляющие устройства, устройства для увлажнения воздуха, антиэлектростатические покрытия и пропитки, нейтрализаторы статического электричества.

В процессе выполнения научного исследования 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) [40].

### **5.1.2 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"[41].

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 82 дБА (по СанПиН 3359-16) [42].

Дополнительные средства для коллективной защиты (СКЗ) от шума извне могут служить современные пластиковые окна и шумоизоляционные панели стен.

Сама панель – это многослойная конструкция (триплекс). Сам ее каркас выполнен из композита на основе натуральных целлюлозных волокон. Плоские слои разделены пространством, которое обеспечивают волнообразные переемычки, по типу гофрированного картона. Все пустоты внутри панели заполнены минеральным гранулатом на базе очищенного кварцевого песка

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

В качестве средств индивидуальной защиты (СИЗ) можно использовать не дорогие шумопоглощающие наушники.

### **5.1.3 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 [43], 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 [43] 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 [43] 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 [43].

Для анализа освещенности на рабочем месте инженера-лаборанта представленного на рисунке 5.1,

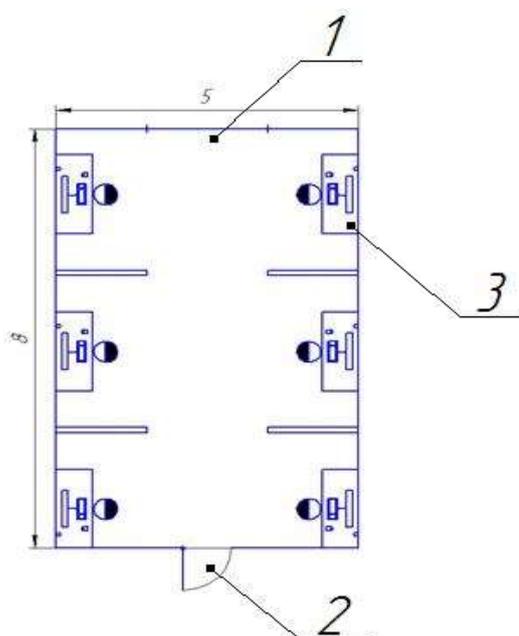


Рисунок 5.1 – Схема рабочего места, где поз.1 окно, поз.2 дверь, поз.3 рабочее место

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен. [44]

Для расчета принимаем что длина помещения  $A=5$  м, а ширина  $B=8$  м, высота  $H=3,5$  м. Высота рабочей поверхности  $h_p = 0,8$  м. Требуемая освещенность по СНиП 23-05- 95  $E= 400$  лк.

Коэффициент отражения стен  $R_c = 50 \%$ , потолка  $R_{\text{п}} = 70 \%$ .  
Коэффициент запаса  $k = 1.5$ , коэффициент неравномерности  $Z = 1.1$

Рассчитаем систему общего люминесцентного освещения.

Выбираем светильник типа ОД,  $l = 1,4$ . принимаем высоту подвеса светильника от уровня потолка  $h_c = 0,2$  м; получаем высоту подвеса светильника над расчетной поверхностью  $h = 3.5 - 0.8 - 0,2 = 2,5$  м;

Определим расстояние между рядами светильников, используя соотношение:

$$L = l * h \quad (14)$$

$$L = 1.4 * 2.5 = 3.5 \text{ м,}$$

При ширине помещения  $A = 5$  м, получаем число рядов светильников:

$$n = A/L = 5/3.5 = 1.4 \sim 2 \quad (15)$$

Определим число светильников в одном ряду:

$$N_p = (B - 2l) / l_{\text{св}}, \quad (16)$$

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

$$N_p = (8 - 2 * 1.17) / 1.23 = 4.6 \sim 4,$$

Таким образом, общее число светильников  $N$ :

$$N = N_p * n \quad (17)$$

$$N = 4 * 2 = 8.$$

Размещаем светильники в два ряда. В каждом ряду можно установить 4 светильников типа ОД мощностью 40 Вт (с длиной 1230мм и шириной 266 мм), при этом разрывы между светильниками в ряду составят от 50 до 500 см. Изображаем в масштабе план помещения и размещения на нем светильников (рис.5.1). Учитывая, что в каждом светильнике установлено две лампы, общее число ламп в помещении  $N = 8 * 2 = 16$ .

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = S / h(A + B) . \quad (18)$$

$$i = 40 / [2.5 * (5 + 8)], = 1.23.$$

Расчетным уравнением метода коэффициента использования светового потока является [44];

$$\Phi = (E_n \cdot S \cdot K_z \cdot Z) / (N \cdot \eta). \quad (19)$$

По таблицам [44] определяем коэффициент использования светового потока для данной формулы  $\eta = 0,53$ ;

Отсюда получаем:

$$\Phi = (400 \cdot 40 \cdot 1,5 \cdot 1,1) / (16 \cdot 0,53) = 3113 \text{ лм}, \quad (20)$$

Определяем потребный световой поток ламп в каждом из рядов:

По табл. 1 выбираем ближайшую стандартную лампу – ЛБ 40 Вт с потоком 3200 лм. Делаем проверку выполнения условия:[44]

$$-10\% \leq (\Phi_{\text{ст}} - \Phi_{\text{расч}}) / \Phi_{\text{ст}} \cdot 100\% \leq +20\% \quad (21)$$

Определяем электрическую мощность осветительной установки

$$-10\% \leq (3200 - 3113) / 3200 \cdot 100\% \leq +20\%$$

$$-10\% \leq 2,7\% \leq +20\%$$

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).

Для схематического изображения размещения светильников необходимо рассчитать расстояние вдоль стен и от торца помещения:

$$L = N_a \cdot L_1 + 2/3 \cdot L_1 + N \cdot L_{\text{лам}};$$

$$L_1 = (L - N \cdot L_{\text{лам}}) / (N_a + 2/3);$$

$$L_1 = (8000 - 4 \cdot 1230) / (3 + 2/3) \sim 840 \text{ мм}; \text{ – расстояние вдоль помещения}$$

$$L_1 = (5000 - 2 \cdot 266) / (1 + 2/3) \sim 2000; \text{ мм – расстояние от торцов}$$

Составим уравнение с 1 неизвестной

$$5000 = L_1 + 2/3 \cdot L_1 + 2 \cdot 266;$$

$$8000 = 3 \cdot L_2 + 2/3 \cdot L_2 + 4 \cdot 1230;$$

Отсюда:

$$5000 - 2 \cdot 266 = L_1 \cdot (1 + 2/3);$$

$$8000 - 4 \cdot 1230 = L_2 \cdot (3 + 2/3);$$

Следственно получаем уравнения:

$$L1=(8000-4*1230)/(3+2/3)=832 \text{ мм} ; - \text{ расстояние от торцов помещения}$$

$$L2=(5000-2*266)/(1+2/3)=2630; \text{ мм} - \text{ расстояние вдоль помещения}$$

расстояние от торцов – 1:

$$l1=832 /3 =277 \text{ мм}$$

$$l2= 2630/3=877 \text{ мм}$$

Размещаем светильники в 2 ряда по 4 светильника. На рисунке 5.2 изображен план помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами.

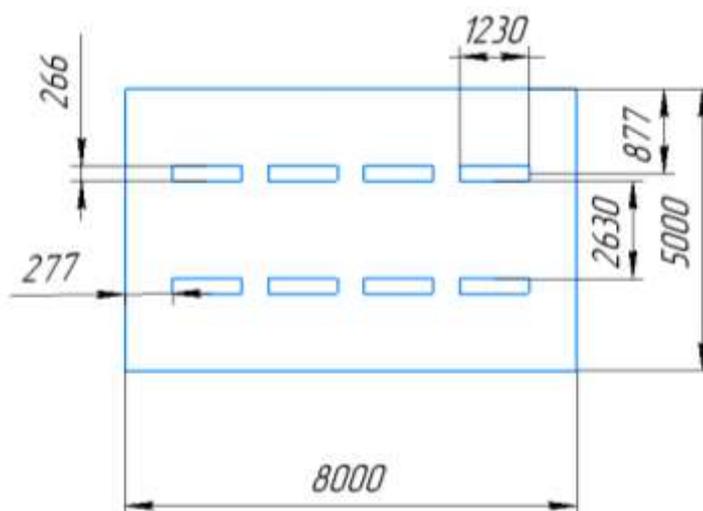


Рисунок 5.2 – План размещения светильников с люминесцентными лампами., размеры установлены в мм

#### 5.1.4 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 [45]. Согласно ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие

санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны [46], 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 [46]. Рассмотрим допустимые требования микроклимата для холодного и теплого периода года:[46].

-В холодный период года категория работы будет средней, температура от 19 до 22оС, влажность относительная влажность должна быть от 49 до 65 % скорость воздуха меньше или равно 0,2 м/с;

-В тёплый период года будет средняя категория работы, температура от 15 до 28 оС, относительная влажность в пределах от 20 до 75 и скорость воздуха меньше или равна 0,5 м/с.

В нашем случае рассматривается рабочий кабинет размерами 8x5 м, как показано на рисунке 1.1, 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 [46].

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 аустенитной стали в 16а корпусе ТПУ микроклимат отвечал нормам изложенных выше.

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

## **5.2 Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды**

### **5.2.1 Факторы электрической природы**

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

В отношении опасности поражения людей электрическим током различают:

1. Помещения без повышенной опасности, в которых отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность.

2. Помещения с повышенной опасностью, которые характеризуются наличием в них одного из следующих условий, создающих повышенную опасность: сырость, токопроводящая пыль, токопроводящие полы (металлические, земляные, железобетонные, кирпичные и т.п.), высокая температура, возможность одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям, технологическим аппаратам, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования - с другой.

3. Особо опасные помещения, которые характеризуются наличием оборудования свыше 1000 В и до 1000 В при наличии двух и более из следующих условий, создающих особую опасность: особой сырости, химически активной или органической среды, одновременно двух или более условий повышенной опасности. Территории размещения наружных электроустановок в отношении опасности поражения людей электрическим током приравниваются к особо опасным помещениям

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) и оборудование используемое в помещении и там преобразуется входящее переменное напряжение в постоянный ток напряжением +3,3 В, +5 В, +12 В 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 проявлении признаков замыкания необходимо незамедлительно

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.

Сейчас безопасным для человека считается напряжение электрической сети 42 Вольта (до недавнего времени – было 36 В), использующееся для

переносных осветительных и бытовых приборов на воздухе и в доме и 12 Вольт, при условии использования переносных светильников и приборов внутри котлов, металлических резервуаров и пр.

Допустимым же для человека током принято считать силу тока, при которой он самостоятельно может освободиться от его воздействия.

Допустимый  $I = 0.1$  А, а  $R_{\text{заземления}}$  – не более 4 ом.

Максимально допустимая величина тока, проходящего через тело человека, зависит от времени его воздействия. Для тока переменного, с его частотой 50 Гц допустимое напряжение прикосновения по ГОСТ12.1.038-82 составляет всего 2 В, а сила тока - всего 0,3 мА. Для постоянного тока – допустимое напряжение прикосновения всего-то 8В, при силе тока в 1,0 мА (данные приведены для времени воздействия менее 10 мин в сутки).

Безопасные для человека уровни напряжения электрической сети в доме получают из нашей бытовой осветительной сети напряжением 220 В, используя при этом понижающие трансформаторы, или напрямую – используя для этого аккумуляторные батареи номинальным напряжением 12 и 24 Вольта

Так как используется оборудование с напряжением до 1000 в то применяются следующие СИЗ:

В условиях работы на оборудовании с напряжением, не достигающим 1000 вольт,

- используются: специальные прорезиненные перчатки, выполненные с использованием современным полимеров, которые способны длительное время выдерживать большое напряжение;

- изолирующие штанги, выполненные с использованием диэлектрического металла, которые прикрепляются к источнику электричества и служат в качестве основного заземлителя, в результате чего обеспечивается безопасная работа;

- специальные клещи, которые могут использоваться в места. Где применение штанги невозможно. С помощью данных клещей также

осуществляются ремонтные мероприятия; специальное оборудование с указателями напряжения, для измерения силы и напряжения тока.

- специальное оборудование с указателями напряжения, для измерения силы и напряжения тока

Также используются дополнительные средства защиты:

К материалам, которые применяются в качестве дополнительных устройств с оборудованием при напряжении менее 1000В относятся:

- специальная прорезиненная обувь, выполненная с применением современных полимеров, которая надежно обеспечивает защиту персонала;

- подставки, выполненные из дерева для осуществления работы с оборудованием без использования штатного заземления;

- специальные лестницы, выполненные из не проводимого металла, которые применяются при проведении работы на определенной высоте.

СИЗ в нашем случае не используются, так как работа происходит на ЭВМ с приведенными выше номиналами.

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» [48] следует принимать в соответствии с таблицей 5,1.

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 5.1–Применение электрооборудования в электроустановках напряжением до 1 кВ

Класс по ГОСТ12.2.00 7.0 РМЭК536	Маркировка	Назначение защиты	Условие 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 РЕ, 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 прикосновения	Питание от безопасного разделительного трансформатора

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

### 5.2.2 Факторы пожарной и взрывной природы

По взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1 - В4, Г и Д. По пожарной опасности наружные установки подразделяются на категории Ан, Бн, Вн, Гн и Д

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. [50] 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 [50].

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 [50].

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.

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.

На стене рядом с местом расположения огнетушителя должна находиться таблица с номерами телефонов экстренного вызова местной и городской пожарной команды[50].

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

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

Огнетушители водо-пенные (ОХВП-10) используют для тушения очагов пожара без наличия электроэнергии. Углекислотные (ОУ-2) и порошковые

огнетушители предназначены для тушения электроустановок, находящихся под напряжением до 1000 В. Кроме того, порошковые применяют для тушения документов.

Для тушения токоведущих частей и электроустановок применяется переносной порошковый огнетушитель, например ОП-5.

План эвакуации людей из лаборатории производственного корпуса в случае ЧС показан на рисунке 5.3.



Рисунок 5.3– План эвакуации при пожаре и других ЧС.

### 5.3 Охрана окружающей среды

Охрана окружающей среды – это комплексная проблема и наиболее активная форма её решения – это сокращение вредных выбросов промышленных предприятий через полный переход к безотходным или малоотходным технологиям производства.

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».

Так же необходимо позаботиться о отдельных контейнерах для отходов бытового характера: отдельные мусорные баки для бумаги, стекла, металлических частей, пластика. Необходимо заключить договор с компанией, вывозящей мусор, чтобы она обеспечивала доставку разделенных отходов фирмам, занимающимся переработкой отходов.

#### **5.4 Защита в ЧС**

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. В случае переморозки труб должны быть предусмотрены запасные обогреватели на газе (с

катализатором). Их количества и мощности должно хватать для того, чтобы работа на производстве не прекратилась. В здании должен храниться трехдневный запас воды на всех сотрудниках.

В случае отсутствия электроэнергии должны быть предусмотрены генераторы энергии (на дизеле), а также генераторы, способные поддерживать стабильное питание сварочного оборудования.

В сильные морозы возможен выход из строя транспорта. В гаражном парке должны находиться запасные автобусы и микроавтобусы. Также для перевозки людей в удаленные районы нужно предусмотреть менее габаритные автомобили, способные работать в сильные морозы.

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. [48].

## **5.5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

1. ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.»

2. 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)

3. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности

4. СанПиН 2.2.4.3359–16. Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах.

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

7 ГОСТ Р 2.2.2006–05. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда.

8 ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны

9 ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

10 ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация».

11 СанПиН 2.2.4.1191-03 Электромагнитные поля в производственных условиях.

12 ППБ 01-03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации.

13 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.

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

#### *Графические материалы*

1) Освещенность на рабочем месте рисунок 5.1,5.2

2) Пути эвакуации рисунок 5.3

#### *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 данной работе проведено исследование влияния схемы нагружения на динамическое поведение аустенитной стали 304L в процессе ударно-волнового нагружения МЭП. На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Установлено, что в процессе трехкратного ударно-волнового нагружения 8 миллиметровой мишени тыльного откола не происходит, глубина лунки абляции составляет  $\sim 2,1$  мм. Следовательно, за один импульс нагружения глубина лунки абляции увеличивается на  $0,7$  мм.

2. По величине микротвердости по толщине мишени выделяются три зоны: фронт I, где микротвердость достигает максимальных значений  $\sim 2100$  МПа, центр, где микротвердость имеет большой разброс и ее средняя величина составляет  $1600$  МПа, и тыл с величиной микротвердости  $\sim 1800$  МПа. Большой разброс микротвердости связан с разным уровнем развития двойникования в зернах с различной ориентации по отношению к ударной волне.

3. Показано, что после повторного прямого однократного нагружения мишени с удаленной первоначальной лункой абляции наблюдается более интенсивное вовлечение кристаллитов в пластическую деформацию и средний уровень микротвердости в центральной части по толщине образца увеличивается до  $2100$  МПа. Явно просматриваются максимумы твердости в районе фронта и тыла мишени ( $2800$  МПа).

4. После повторного обратного нагружения мишени практически весь материал подвергается пластической деформации. Интенсивность пластического течения в разных зернах не одинакова. Это связано с влиянием ориентации зерен по отношению к ударной волне. Микротвердость по всей толщине мишени практически выравнивается, и ее средний уровень достигает  $2400$  МПа.

## Список литературы

1. Коршунов Л.Г. //ФММ. 1992. № 8. С. 6-13.
2. Коршунов Л.Г., Черненко Н.Л. // Трение и износ. 1984. Т.5. № 1. С. 106-112.
3. Сильман Г.И. // МиТОМ. 2006. № 1. С. 3-7.
4. Марганцовистая сталь. – М.: Metallurgizdat, 1959. – 94 с.
5. Spezialstähle. Lehrbuch für Gymnasien.//Goldstein M.I. Wexler, Yu.G.: Metallurgy, 1985, 408
6. Волынова Т. Ф. Высокомарганцевые сплавы и стали. – М.: Metallurgiya, 1988. – 340 с.
7. Элингер З., Вебер К. Производство отливок из специальных сталей. – М.: Машгиз, 1960. – 141 с
8. Новомейский Ю. С., Лившиц В. И., Евтюшкин Ю. А. Свойство и применение комплексно-легированных высокомарганцовистых сталей, 1970. – 70 с.
9. Strukturelle hochfeste kohlenstoffarme// Stähle der martensitischen Klasse. Kleiner// L.M. , 2008, 302
10. Сагарадзе В.В., Уваров А.И. Упрочнение аустенитных сталей. М.: - Наука, 1989. 270 с.
11. Гуляев А.П. Металловедение. Учебник для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Metallurgiya, 1986. 544 с.
12. ГОСТ 5632-72 Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки.
13. 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

14 C.A. Bronkhorsta\*, J.R. Mayeurc, V. Livescub, R. Pokharelb, D.W. Brownb, G.T. Gray IIIb /Structural representation of additively manufactured 316L austenitic stainless steel//International Journal of Plasticity// 2019 – 86 p.

15. 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

16 Lee, Woei-Shyan & Cheng, Jen-I & Lin, Chi-Feng. (2004). Deformation and failure response of 304L stainless steel SMAW joint under dynamic shear loading. Materials Science and Engineering: A. 381. 206-215. 10.1016/j.msea.2004.04.034.

17. 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.

18. 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.

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

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

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. 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.

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

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

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

28. 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.

29. 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.

30. 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.

31. Григорьев С. Н., Смоленцев Е. В., Волосова М. А. Технология обработки концентрированными потоками энергии: учебное пособие – Старый Оскол, 2009. – 280 с.
32. Казаков Ю. Ф. Концентрированные потоки энергии и физические основы их генерации: учебное пособие. – Саратов, 2001. – 100 с.
33. 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.
34. 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).
35. 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.
36. 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.
37. Атрошенко А.П., Федоров В.И. Металлосберегающие технологии кузнечно-штамповочного производства. - Ленинград: Машиностроение, 1990. - 279 с.
38. Атрошенко А.П., Федоров В.И. Металлосберегающие технологии кузнечно-штамповочного производства. - Ленинград: Машиностроение, 1990. - 279 с.
39. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: метод. указания / Том. пол-й. ун-т. – Томск 2014. – 73 с.

ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.»

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)

ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности  
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. БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ. Рекомендовано в качестве практикума Редакционно-издательским советом Томского политехнического университета. – Томск Издательство Томского политехнического университета 2009 – 101с.

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.

## Приложение А

### 3. Materialien und Methoden

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ81	Барский Николай Андреевич		

Руководитель

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

Консультант – лингвист отделения иностранных языков ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОИЯ	Щеголихина Юлия Викторовна	канд. фил. н.		

Mit der rasanten Entwicklung der Luft- und Raumfahrttechnik und dem modernen Hochgeschwindigkeitsaufprall auf Werkstoffe werden hohe Anforderungen an eine Reihe physikalischer und mechanischer Eigenschaften gestellt. Werkstoffe und Legierungen müssen verschiedene Betriebseigenschaften erfüllen, statischen und dynamischen Belastungen bis zu den höchstmöglichen Werten standhalten.[1] Dies gilt für Funktechnik geräte (beständig gegen Änderungen des Magnetfelds), Luft- und Raumfahrt- und Raketen technologie (beständig gegen plötzliche Temperaturänderungen, Exposition gegenüber starken elektromagnetischen Feldern sowiezuver lässigen Korrosionsschutz und widerstandsfähig gegen Stoß abrieb).Austenitische Stähle zweier Legierungssysteme werden unter diesen Bedingungen häufig verwendet: Nickel-Chrom (Stahl12X18H10T, 304, 304L) und hochmanganverschleißfest (wie Stahl 110Г13) die besten Eigenschaften besitzen und in einem weiten Temperaturbereich bestehen bleiben. Sie haben sich unter dynamischer Belastung unter dem kombinierten Einfluss eines Schleifmittels bewährt. [2] Bis heute gibt es eine Reihe von. Forschung über die Reaktion auf einen solchen Effekt der Struktur des Materials 9sowohl von der Vorder- als auch von der Rückseite der Proben. Insbesondere wurde die, minimale Material dicke festgelegt, die bei Einwirkung einer Stoßwelle mit einer Amplitude von ~ 20 GPa nicht zueinemhinteren Abplatzerführt. Unter realen Betriebsbedingungen kann das Material wiederholt einer solchen Exposition ausgesetzt werden, wodurch sich das Belastungsschemaändert. Dies gilt insbesondere für den Einfluss von Kohlenwasserstoffen sowohl von der Vorderseite als auch von der Rückseite des Ziels. Eine solche dynamische Belastung im Labor zu realisieren ist sehr schwierig. Darüber hinaus wird dies durch die Frage der Konservierung der Probe nerschwert, die für die weitere Strukturforschung erforderlich sind. Daher kann MEP der am besten geeignete Weg sein, um einen solchen Effekt zu erzeugen. [1]

## 1. Literaturübersicht

Die erste Verwendung von Hadfield-Stahl in der Militärindustrie: die Herstellung von Panzerketten im Ersten Weltkrieg. Die Laufleistung wurde von 500 km auf 48.000 km erhöht, dh fast zehnmals von 1915 bis in die 80er Jahre XX Jahrhundert - Herstellung von Infanteriehelmen für Soldaten usw. [2]

Aus Hadfield Stahl werden hergestellt:

- 1) Abriebprodukte;
- 2) Stark belastete Teile, die eine erhöhte Verschleißfestigkeit erfordern.

Robert Hadfield stellte fest, dass sich dieser Stahl völlig von anderen Stählen unterscheidet: Nach dem Aushärten wurde die geschmiedete Probe nach dem Abschrecken nicht härter als der gesamte Stahl, sondern weicher. Hadfield-Stahl (0,9-1,4% C; 13% Mn; 0,8-1,0% Cr und das Verhältnis von Mangan zu Kohlenstoff beträgt nicht weniger als 10) hat einzigartige Eigenschaften – hohe Duktilität, die Fähigkeit zur intensive Kaltverfestigung, sowie geringe Verschleißrate bei Gleitreibung. Die Mikrohärtigkeit von Hadfield-Stahl während der Reibung kann sich 3-4-mal erhöhen und 9000-11000 MPa betragen. [2] Es ist zu beachten, dass viele der im Vergleich zu G13 härteren Materialien hinsichtlich der Verschleißfestigkeit schlechter sind. Einige Stähle, die die Fähigkeit zum Aushärten besitzen, sind Hadfield-Stählen hinsichtlich der Verschleißfestigkeit während der Gleitreibung unterlegen, was mit Stoßbelastungen und Abrieb in der Reibungszone einhergeht. Die in [2–4] dargestellten Daten zeigen, dass Hadfield-Stahl auch unter Bedingungen extrem großer plastischer Verformungen und hoher Temperaturen, die während Reibung und Scherung auftreten, eine austenitische Struktur beibehält. [3]

Dies war jedoch nicht die einzige Überraschung - der neue Stahl erlag weder dem Drehen noch dem Fräsen. Nach dem Kaltschmieden wurden die vom Hammer getroffenen Bereiche hart, und je größer der Verformungsgrad war, desto härter wurde der Stahl. Aufgrund seiner hohen Härte und Verschleißfestigkeit sowie

seiner Fähigkeit, starken Stößen standzuhalten und diese ohne Zerstörung zu absorbieren, erlangte Hadfield-Stahl schnell Anerkennung in der Industrie [1].

Hadfield-Stahl spielt im Maschinenbau als Baustoff eine große Rolle. Produkte, die unter Betriebsbedingungen aus einem solchen Stahl hergestellt sind, ohne ihre elastisch-viskosen Eigenschaften in ihrer Masse zu verlieren, erhalten eine hohe Festigkeit, Härte und Verschleißfestigkeit der Oberflächenschichten, die äußeren Einflüssen ausgesetzt sind. Aus Hadfield-Stahl werden hergestellt: Eisenbahnkreuze, Fensterstangen in Gefängnissen, Kettengleise, Brecherteile. [2]

Stahl mit einem Gehalt von 12 bis 14% Mn ist die Standardqualität für Bergbaumaschinen. Bei der Verarbeitung besonders abrasiver Materialien kann eine genietete Schicht, die üblicherweise eine Tiefe von etwa 3 mm aufweist, aufgrund von abrasivem Verschleiß beim Aufprall abgenutzt oder entfernt werden, was zu einem schnellen Verschleiß eines weicheren, nicht genieteten Grundmetalls führt. Diese Stahlsorte hat eine Anfangshärte von ca. 200 HB. Während des Betriebs steigt die Härte auf ca. 450 HB [2].

Mangan ist ein austenitisierendes Element, das sich in Legierungen mit Eisen in einer  $\gamma$ -festen Lösung stark ausdehnt. Im Gegensatz zu den meisten Metallen manifestiert sich in Mangan die interatomare Bindung nicht durch ein Gas freier Elektronen, sondern durch eine kovalente Bindung und bleibt auch in gemischten Ferromangankristallen bestehen. Die kovalente Bindung erfolgt durch Paare äquivalenter Elektronen mit antiparallelen Spins, die gleichzeitig zu zwei benachbarten Atomen gehören. Die Entwicklung kovalenter Bindungen trägt zu einer Abnahme der Kompaktheit des Kristallgitters bei und beeinflusst die mechanischen Eigenschaften des Kristalls stark [4].

Mangan bezieht sich auf Übergangsmetalle mit einer ungefüllten D-Schale. Übergangsmetalle haben von allen Elementen des periodischen Elementsystems die höchsten Bindungsenergien. Alle Modifikationen von Mangan besitzen abnormale Eigenschaften für reines Metall, einen extrem hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten und einen hohen spezifischen elektrischen Widerstand [5].

Durch die kombinierte Anwesenheit von Mangan und Kohlenstoff in Stahl wird der Effekt der Expansion der  $\gamma$ -Region verstärkt. Kohlenstoff hat einen signifikanten Einfluss auf die physiko mechanischen Eigenschaften von Stahl mit hohem Mangangehalt. Optimal ist die Kohlenstoffkonzentration 1,0 - 1,2%. Das Überschreiten der angegebenen Grenzwerte für die Kohlenstoffkonzentration führt zu einer starken Abnahme der Zähigkeit von Stahl und zu einer weniger intensiven Erhöhung der Verschleißfestigkeit. Dies ist auf das Kornwachstum und folglich auf eine Zunahme der Neigung von Stahl zur Rissbildung nach dem Gießen und der Wärmebehandlung zurückzuführen [5]. Eine Abnahme der Kohlenstoffkonzentration verschlechtert die Festigkeitseigenschaften und die Verschleißfestigkeit von Stahl, und bei einem Kohlenstoffgehalt von 0,8% oder weniger kann eine martensitische Komponente in der Stahlstruktur auftreten, und ihre Eigenschaften verschlechtern sich stark. Die Stabilitätsgrenze von Manganstahl mit einem Gehalt von 13-14% Mn beträgt 0,8 - 0,9% C. [2]

Eine große Variation des Mangangehalts (10–15%) in Stahl wirkt sich geringfügig auf seine Eigenschaften aus, und ein übermäßiger Anstieg des Mangangehalts in Stahl (über 12–13%) führt zu Kornwachstum. Wenn der Mangangehalt in Stahl auf 9 - 11% reduziert wird, nimmt die Beständigkeit des Stahls ab.

Mit einem Gehalt von 1,0 bis 1,3% Kohlenstoff und 11 bis 14% Mangan in Stahl mit hohem Mangangehalt wird Austenit sehr stabil, aber die kritische Rate der Karbidausfällung ist so hoch, dass hohe Abkühlraten erforderlich sind, um eine rein austenitische Stahlstruktur zu erhalten. während die Gussteile einen mehr oder weniger gleichmäßigen Querschnitt haben sollten. Stahl mit einer rein austenitischen karbid freien Struktur ist formbar und im kalten Zustand schwer zu verformen. Das Vorhandensein von Carbiden beeinträchtigt seine mechanischen Eigenschaften erheblich. Zu dieser Gruppe gehört der klassische Hadfield-Stahl. [6]

Abbildung 1 zeigt das Zustandsdiagramm von Fe - C - Mn bei unterschiedlichen Kohlenstoff- und Mangangehalten. [7] Die Mikrostruktur von

Hadfield-Stahl besteht aus Austenit mit einer Carbid phase variabler Zusammensetzung, die konzentriert ist. Carbide begleiten die Freisetzung von Ferriten, die aufgrund der Abreicherung der festen Lösung gebildet wurden. Sie können für hohe Temperaturen verwendet werden. Hadfield Steel ist eine Methode zum intensive Härten während des Härten. [7]

Die Streckgrenze von Manganstahl wird am effektivsten durch starke Carbiddbildner beeinflusst. Hartmetallbildner - Cr, W, Mo, verbessern die Festigkeitseigenschaften von Stahl und verringern dessen Duktilität. Stahl mit solchen Additiven hat eine grobe dendritische Struktur mit einem Carbid netzwerk entlang der Korngrenzen und erfordert eine ziemlich komplizierte Wärmebehandlung mit erhöhten Abschrecktemperaturen (bis zu 1100 - 1150 ° C). [5]

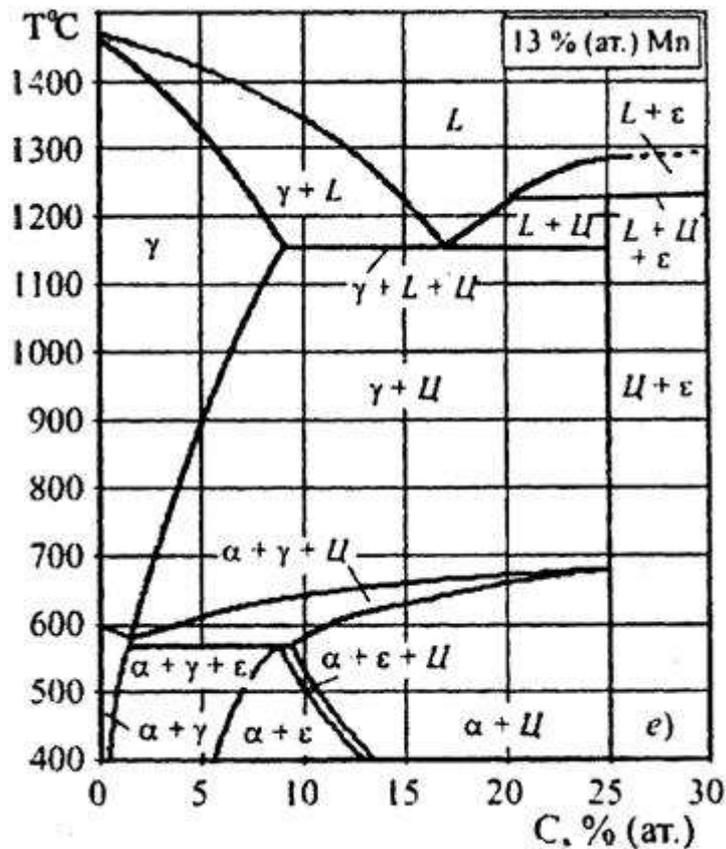


Abbildung 1 - Polythermischer Schnitt des Zustandsdiagramms der Legierung Fe-C-Mn mit 13% Mangan [7]

In den meisten Fällen ist Chrom das wichtigste zusätzliche Legierungselement. Chromstein kostengünstiges Element und sein quantitativer Gehalt an Hadfield-Stahl

beträgt etwa 1%, was die Verarbeitbarkeit von Stahl, die Festigkeit und die Verschleißfestigkeit verbessert. [8]

Feinkorn wirkt sich günstig auf die mechanischen Eigenschaften von Stahl mit hohem Mangengehalt aus, was durch Verformung erreicht wird. Mit zunehmender Zeit der Kaltverformung härtet der Stahl härter aus - es kommt zu einer Härtung und Verdichtung des Kristallgitters. Die Härte erreicht 500 - 650 HB. Wenn die Verformung nahe an der Bruchstelle des Metalls liegt, kann Stahl hart werden, gleich 800 - 850 HB [1].

Die physikalisch-mechanischen Eigenschaften von Hadfield-Stahlguss sind in den Tabellen 1 und 2 gezeigt.

Tabelle 1 - Mechanische Eigenschaften [2]

Temporärer Widerstand $\sigma_B$ , MPa	Streckgrenze $\sigma_{0,2}$ , MPa	Relative Verengung $\psi$ , %	Relative Dehnungsduktilität, %	Brinellhärte HB
800 – 900	310 – 350	30 – 50	15 – 20	200

Tabelle 2 – Physikalische Eigenschaften [2]

Elastizitätsmodul E, MPa	Schubmodul G, MPa	Dichte $\rho$ , kg / Kubikmeter m
200000	78000	7820

Hadfield-Stahl kann einer Druckbelastung von bis zu 550 MPa bei einer plastischen Verformung von 50 - 55% standhalten [5].

Die Fließfähigkeit dieses Stahls ist gut und verbessert sich mit zunehmendem Kohlenstoffgehalt. Auch die Fließfähigkeit wird durch Mangan, Silizium und Phosphor verbessert. Die Schrumpfung von Stahl mit hohem Mangengehalt während des Gießens ist viel höher als die von Kohlenstoffstählen. Die große Bedeutung des

linearen Schrumpfung führt zum Auftreten heißer Risse und Schrumpfschalen in Gussteilen [6].

Die Tendenz von Hadfield-Stahl zur Bildung heißer Risse wird nicht nur durch eine starke lineare Schrumpfung verursacht, sondern auch durch: verringerte Wärmeleitfähigkeit, hohe Formschrumpfungsbeständigkeit, erhöhte Empfindlichkeit des Metalls gegenüber Überhitzung während des Gießens und Spannungskonzentration in Gussteilen, geringe Duktilität und Festigkeit des Stahls bei hohen Temperaturen [7].

Die Schlagzähigkeit ist eines der wichtigsten Merkmale für die Zuverlässigkeit von Gussteilen aus hochmanganhaltigem Stahl. Trotz der großen Anzahl von Arbeiten, die sich mit Stahl befassen, gibt es noch keine einzige Theorie über seine Selbsthärtung unter Stoßbelastung. Nach Ansicht einiger Autoren spielt das Schleifen von Blöcken und Mikrospannungen eine große Rolle bei der Verstärkung von Hadfield-Stahl. Die hohe Viskosität von Austenit sowie die ausreichende Festigkeit und Verschleißfestigkeit machen Hadfield-Stahl zu einem unverzichtbaren Material für Teile, die gleichzeitig gegen Verschleiß und Schock arbeiten. Stahlgussteile werden selten einer zusätzlichen Verarbeitung unterzogen, da sie durch Schneiden aufgrund der Aushärtung der Oberfläche während des Schneidprozesses schlecht verarbeitet werden. [5] Die Schlagfestigkeit ist empfindlich gegenüber Änderungen der chemischen Zusammensetzung von Stahl sowie seiner Schmelz-, Guss-, Kristallisations- und Wärmebehandlungsparameter. Es gibt jedoch Hinweise darauf, dass die Zähigkeit von Stahl nicht von seiner chemischen Zusammensetzung abhängt und fast vollständig durch den Grad der Verunreinigung des Metalls mit nichtmetallischen Oxideinschlüssen in Abwesenheit von restlichen Ferromangancarbiden bestimmt wird [2].

Unter Abriebbedingungen mit erheblichem Aufprall oder großspezifischen statischen Belastungen weist Hadfield-Stahl eine hohe Verschleißfestigkeit auf. Dieser Stahl versagt jedoch schnell bei intensivem Abrieb (wenn der Aufprall oder die spezifische statische Belastung gering und instabil sind). [8]

Unter diesen Bedingungen ist die Verschleißfestigkeit von hochmanganhaltigem Stahl gering. Dies liegt daran, dass während des Betriebs nicht genügend Aushärtung beobachtet wird (nicht geklebt). [5] Gussteile aus Manganstahl sollten daher angelassen werden [6].

Die austenitische Klasse umfasst hochlegierte Stähle, die während der Kristallisation eine überwiegend einphasige austenitische  $\gamma$ -Fe-Struktur mit einem flächenzentrierten kristallinen (fcc) Gitterbilden und diese beim Abkühlen auf kryogene Temperaturen beibehalten. Die Menge der anderen Phase – hochdotierter Ferrit ( $\delta$ -Fe mit einem körperzentrierten kristallinen (BCC) Gitter) variiert zwischen 0 und 10%. Sie enthalten 18 ... 25% Cr, das Wärme- und Korrosionsbeständigkeit bietet, sowie 8 ... 35% Ni, das die austenitische Struktur stabilisiert und die Wärmebeständigkeit, Duktilität und Verarbeitbarkeit von Stählen in einem weiten Temperaturbereich erhöht. Dies ermöglicht die Verwendung austenitischer Stähle in hochwertigen korrosionsbeständigen, hitzebeständigen, hitzebeständigen, kryogenen Baustoffen in chemischen Anlagen, Wärmekraftwerken und Kernkraftwerken, die kompatible Spannungen, hohe Temperaturen und aggressive Umgebungen verwenden. [9] Austenitischer Stahl ist eine hochlegierte Eisenlegierung, legierte Elemente, die den  $\gamma$ -Bereich erweitern: Kohlenstoff, Nickel, Mangan, Kobalt;  $\alpha$ -expandierende Bereiche von  $\alpha$ -Eisen: Chrom, Aluminium, Wolfram, Molybdän, Niob, Silizium, Titan. Solche Stähle haben überwiegend eine Struktur mit einem flächenzentrierten kubischen (fcc) Gitter vom Kristallisationspunkt bis zu kryogenen Temperaturen. Es gibt auch eine Phase mit einem körperzentrierten kubischen (bcc) Gitter, dargestellt durch hochdotiertes  $\delta$ -Ferrit in einer Menge von 0 bis 10 Vol .-%. Die austenitischen Stahlsorten sind in folgende Basen unterteilt: Nickel, Chrom-Nickel, Mangan, Chromo mangan, Nickel, Chromo mangan, Nickel-Chrom-Molybdän und hohes Silizium. Die am häufigsten verwendeten Legierungen sind Nickel, Chrom-Nickel und Mangan [12].

Austenitische Stähle werden hauptsächlich als korrosionsbeständige, hitzebeständige, hitzebeständige, kryogene Baustoffe in chemischen, thermischen und kerntechnischen Anlagen eingesetzt, wo sie der kombinierten Einwirkung von Spannungen, hohen Temperaturen und aggressiven Umgebungen ausgesetzt sind.

Die Festigkeit austenitischer Stähle hängt von den Eigenschaften des Austenits und den Faktoren ab, die die Feinstruktur (Unterkonstruktion) von Stahl bestimmen. Legierungselemente, die zusätzlich eingeführt werden, um Austenit zu stabilisieren und Stahl zu härten, können bei Wechselwirkung miteinander neue Phasen bilden, wodurch sich die Anzahl und Zusammensetzung der ausgefallten Phasen ändert [11].

Der Hauptfaktor für die Korrosionsbeständigkeit von Stahl ist die Gleichmäßigkeit der festen Lösung von Chrom in Eisen, das Fehlen seiner Verbindungen mit Kohlenstoff und anderen Elementen, was zu einer lokalen Abreicherung von Chromstahl führt und Grenzflächen zwischen Phasen mit fehlerhaften Abschnitten des Kristallgitters schafft, in denen die Atombindungen geschwächt sind. Somit entsteht das Chromcarbide  $\text{Cr}_23\text{C}_6$ . enthält 94% Cr und erschöpft die umgebende Matrix mit 18 ... 25% Cr. Daher unterscheiden sich die Zusammensetzungen korrosionsbeständiger Stähle von hitzebeständigen Stählen durch ein Minimum an Kohlenstoff (bis zu 0,02%), das für sie eine schädliche Verunreinigung darstellt, oder durch das Vorhandensein stöchiometrischer Stabilisierungselemente (Titan, Niob), die haltbarere Carbide bilden als Chrom, wodurch die Verarmung der festen Lösung mit Chrom beseitigt wird. Um die Festigkeit und Stabilität von Austenit in einigen Stählen zu gewährleisten, wird ein Teil des Kohlenstoffs durch Stickstoff ersetzt. Es verhindert die Bildung von  $\alpha$ -Fe, stärkt den Austenit und bildet keine Carbide [8].

Austenitische Stähle werden durch verschiedene Mechanismen gut gehärtet: feste Lösung, Verformung, Dispersion und Härtung aufgrund magnetischer Ordnung [12].

Stahl 12X18H10T - Chrom-Nickel-Edelstahl der austenitischen Klasse. Stahl dieser Marke kann aufgrund seiner einzigartigen qualitativen Eigenschaften in verschiedenen Bereichen der Produktion und Industrie eingesetzt werden [2]. Das Material ist in der Lebensmittel-, Öl-, Kraftstoff- und Energieindustrie, in der chemischen Industrie, im Maschinenbau sowie in der Flugzeug- und Raumfahrtindustrie weit verbreitet. In der chemischen Industrie wird die Stahlsorte 12X18H10T zur Herstellung von Behältern verwendet, die für den Betrieb unter hohem

Druck ausgelegt sind, sowie für Geräte zur Herstellung von flüssigem Sauerstoff. Korrosionsbeständiger Stahl wird zur Herstellung von geschweißten Geräten und Strukturen verwendet, deren Betrieb den Kontakt mit oxidierenden Medien, organischen Lösungsmitteln und anorganischen Säuren mittlerer Konzentration beinhaltet. Aus diesem Material werden Rohre hergestellt, die Lösungen von aggressiven Flüssigkeiten wie Phosphorsäure, Salpetersäure, Essigsäure sowie anderen Basen und Salzen transportieren. Stahl ist in der Kryotechnik weit verbreitet (bei Temperaturen bis zu minus 269 ° C) sowie für Reaktions-, Wärmeübertragungs- und Tankgeräte, einschließlich für Hochdruckleitungen und Dampfheizgeräte mit der angegebenen Betriebstemperatur bis plus 600 ° C. Teile für Auspuffkrümmer, Ofenausrüstung und Schalldämpfer bestehen aus Stahl dieser Marke. Darüber hinaus wird es zur Herstellung von rostfreien Blechen, Kreisen, Drähten (einschließlich zum Schweißen) und Rohren verwendet. Maschen, Federn, Kabel und Seile bestehen aus Stahlgewinden [9].

Stahl 12X18H10T nach [10] enthält bis zu C - 12%, Si bis zu 0,8%, Mn bis zu 2%, Ni 9 bis zu 11%, S bis zu 0,02%, P bis zu 0,035%, Cr 17 bis zu 19%, Cu bis zu 0,3% Ti 0,4 - 1%, Fe  $\leq$  67%.

Die Einführung einer ausreichenden Menge Nickel in 18% igen Chromstahl macht ihn austenitisch, was bessere mechanische Eigenschaften, eine geringere Tendenz zum Kornwachstum sowie ein korrosionsbeständigeres und nichtkaltes Brechen bietet. Rostfreie Stähle mit 18% Cr und 10% Ni werden am häufigsten im Maschinenbau, in Konsumgütern sowie in Architektur und Skulptur verwendet. Die Idee der Phasenbildung in rostfreien Chrom-Nickel-Legierungen wird durch das Fe-Cr-Ni-System vermittelt. Abbildung 2 zeigt einen horizontalen Schnitt bei 650 ° C des Fe-Cr-Ni-Systems (durchgezogene Linien). [13] Die  $\gamma$ -einphasigen und  $\alpha$ -Bereiche sind durch die zweiphasigen  $\gamma + \alpha$ -Bereiche getrennt. Wenn der Chromgehalt mehr als 20% beträgt, erscheint die  $\alpha$ -Phase (chemische Verbindung FeCr). Die Position des Zweiphasenbereichs  $\gamma + \alpha$  hängt von der Temperatur ab. Bei abnehmen der Temperatur unter 650 ° C geht der Bereich  $\gamma + \alpha$  nach rechts und seine äußerste Position bei 20 ° C ist durch gestrichelte Linien dargestellt, die an den Punkten c und g

enden. Mit zunehmender Temperatur geht der Bereich nach links und seine äußerste Position bei 1100 °C zeigt gestrichelte Linien endet an den Punkten a, d.

Zusätzlich zu thermischen Härtungsverfahren wird häufig eine plastische Verformung verwendet, um die Festigkeit austenitischer Stähle zu erhöhen. Der Einfluss der plastischen Verformung auf die Änderung der Festigkeitseigenschaften hängt sowohl vom Grad der plastischen Verformung als auch von der Dehnungsrate und der Art der Belastung ab. Unter quasistatischer Belastung des Materials treten Härtung und Bruch durch Mechanismen auf, die sich von denen unter dynamischer Belastung unterscheiden, insbesondere bei einer hohen Dehnungsrate [14].

Bei kleinen Verformungen (bis zu 10%) bilden sich Versetzungscluster und Versetzungsgewirr. Versetzungscluster sind nur bei Stählen flach, bei denen die Energie von Stapelfehlern ausreichend niedrig ist. Mit zunehmendem Verformungsgrad nimmt der Abstand zwischen getrennten Versetzungsgruppen ab und es beginnt sich eine Zellstruktur zu bilden. Es ist ein alternierender Bereich mit einer hohen und niedrigen Versetzungsdichte. Die Bildung der Zellstruktur erfolgt umso früher, je früher Austenit packungsfehler auftreten. Infolge einer Zunahme der Versetzungsdichte wird eine monotone Zunahme der Streckgrenze und Zugfestigkeit sowie eine Abnahme der Duktilität von austenitischem Stahl beobachtet [5].

Mit einer weiteren Erhöhung des Grads der plastischen Verformung (über 30%) verengt sich die Größenverteilung der Zellen und die Zellen selbst werden zerkleinert. Die Dicke des Zell-Subrains nimmt ab und die Versetzungsdichte innerhalb des Subrains nimmt zusammen mit der volumenmittleren Versetzungsdichte zu [13].

Während der plastischen Verformung härtet Ferromanganaustenit stärker aus als Eisen-Nickel. Dies liegt daran, dass letztere eine höhere Energie an Verpackungsfehlern aufweist. Je niedriger diese Energie ist, desto geringer ist die Tendenz von Split-Versetzungen zum Querschlupf [7].

Das Erhitzen von verformtem Stahl führt zu einer Verringerung der Versetzungsdichte. Die Temperatur, bei der ein Erweichen des Stahls beobachtet wird, hängt stark von der Legierung von Austenit ab, insbesondere mit Elementen wie Molybdän, Wolfram, Chrom, und unterscheidet sich bei Stählen merklich. Die

Abnahme der Festigkeit geht mit einer Zunahme der plastischen Eigenschaften einher. Die warme Verformung (bei Temperaturen über Raumtemperatur, aber niedriger als die Rekristallisationstemperatur) im Vergleich zur kalten Verformung (bei Raumtemperatur und niedriger) ermöglicht es, bei Stählen geringere Festigkeitseigenschaften, jedoch höhere plastische Eigenschaften zu erzielen. Daher sind Glühvorgänge von verformtem Austenit und Warmverformung hinsichtlich sich ändernder mechanischer Eigenschaften gleichwertig [15].

## 2. Materialien, Ausrüstung und Forschungsmethoden

Material. Stahlproben 304L [(Fe - (18 - 20), Cr - (8 - 12), Ni - 2,0, Mn - 1,0, Si - 0,03, C - 0,03, S - 0,045 P%)] hatten die Form von Platten 20 mm × 20 mm 8 mm dick, parallel zur Walzebenegeschritten. Um eine gleichmäßige Mikrostruktur zu erhalten und die Defektdichte zu verringern, wurden die Proben ab 1050 ° C (2 h) in Wasser abgeschreckt. Im Ausgangszustand (nach dem Abschrecken) hatten die Proben die Struktur einer  $\gamma$ -festen Lösung (Austenit); die durchschnittliche austenitische Korngröße betrug 25  $\mu\text{m}$ ; Es waren auch Niederschläge von  $\delta$ -Ferrit vorhanden, die entlang der Walzrichtung verlängert waren Abbildung 2. In einigen austenitischen Körnern waren Lösungs-zwillinge vorhanden.

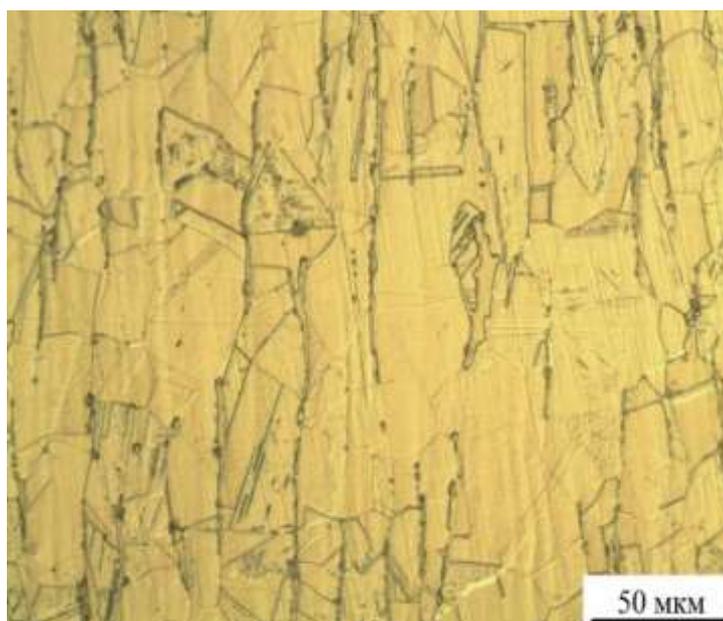


Abbildung 2 - Die Mikrostruktur der ersten Stahlproben 304L

Ausrüstung für dynamisches Laden. Ein Elektronenbeschleuniger SINUS-7 wurde als Generator von Stoßwellen verwendet. Ein Elektronenstrahl wurde in einer Vakuumdiode mit einer halb kugelförmigen Explosionsemissionskathode mit einem Durchmesser von 6 mm (Stahl Typ 304) in einem äußeren longitudinalen Magnetfeld von 17 k Oe gebildet. Mit einer Spannung an der Kathode von 1,35 MV und einem Spalt zwischen Kathode und Anode von 7 mm erreichte der Strom in der Diode 20 kA. Proben (Targets) wurden hinter einer Graphitmembran mit einem Durchmesser von 8 mm und einer Dicke von 3 mm in einer geerdeten Anode montiert. Die Rückseite der Probe blieb frei. Die maximale Strahlstromdichte auf dem Target betrug  $25 \text{ kA} / \text{cm}^2$ , d.h. Spitzenleistungsdichte  $3,4 \leq 10^{10} \text{ W} / \text{cm}^2$ ; Die Pulsdauer des Elektronenstroms bei halbem Maximum beträgt 45 ns und die einfallende Energiedichte beträgt  $1,2 \text{ kJ} / \text{cm}^2$ . Die Streuung der Amplitudenwerte der Beschleunigungsspannung und der Stromdichte auf dem Ziel von Impuls zu Impuls überschritt 10% nicht. Die Dicke der Targets aus 304L Stahl betrug 8 mm und zwei Targets zu je 6 mm. Aufgrund der Volumen natur der Energiefreisetzung (der Elektronenweg und die Tiefe der Energie freisetzungszone betragen  $\sim 1 \text{ mm}$ ) erfolgte die Ablation des Zielmaterials in einem Impulsunter Bildung eines Lochs mit einem Durchmesser von  $\sim 7 \text{ mm}$ . Die durchschnittliche Tiefe der Ablationsbohrung, gemessen an Querschnitten in verschiedenen Abständen von ihrem Zentrum, betrug  $0,7 \pm 0,1 \text{ mm}$ . Dies zeigte an, dass die radiale Verteilung der Strahlstromdichte auf dem Target nahezu gleichmäßig war. 8 mm dicke Targets (Nr. LP-13, Nr. LP-14 und Nr. LP-19) wurden mit drei Ladeimpulsen bestrahlt. Probe Nr. LP-19 blieb Zeuge für weitere Untersuchungen der Mikrostruktur und Mikrohärtigkeit.

In den Proben Nr. LP-13 und Nr. LP-14 wurde nach Bestrahlung eine Ablationsvertiefung auf eine Dicke von 5,1 mm geschnitten (entfernt). Als nächstes wurde Probe Nr. LP-13 mit einem einzelnen Impuls von der Seite des früheren Ablationsschachts geladen (direkte Beladung), und Probe Nr. LP-14 wurde von der Rückseite geladen (umgekehrte Beladung). Forschungsmethoden. Die Entwicklung der Mikrostruktur in den Proben in Richtung der Kohlenwasserstoffausbreitung wurde unter Verwendung

der optischen Metallographie (OM) untersucht. OM wurde an Querschnitten durchgeführt, die entlang der Achse des Strahls durch das Elektroschmelz-Verfahren geschnitten wurden. Zur Identifizierung der Mikrostruktur wurde chemisches Ätzen verwendet: HNO<sub>3</sub> (1 Vol. Teil) und HCl (3 Vol. Teil). Die Mikrostruktur der Proben wurde unter Verwendung eines optischen Mikroskops Olympus GX51 analysiert, das mit einem SIAMS 700-Bildanalysator ausgestattet war. Die Mikrohärtigkeit von stoßbeladenen Proben wurde mit einem PMT-3-Instrument an Querschnitten in zwei Spuren mit einem Tiefenschritt in jeder Spur von 100  $\mu\text{m}$  und einem Schussversatz zwischen Spuren von 50  $\mu\text{m}$  gemessen bei einer Last von 0,981 N.