

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

Институт физики высоких технологий

Направление подготовки Материаловедение и технологии материалов

Кафедра Материаловедение в машиностроении

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование влияния ультразвуковой обработки на микроструктуру и механические свойства технического титана BT1-0

УДК 620.18

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ4А	Хайруллин Рустам Равильевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. лаб. ФПЯ ИФПМ СО РАН	Панин А. В.	Д. ф.-м.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Гаврикова Н. А.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Федорчук Ю. М.	Д. т. н		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Материаловедение в машиностроении	Панин В.Е.	Д. ф.-м.н., акад. РАН		

Планируемые результаты обучения по ООП 22.04.01 Материаловедение и технологии материалов (магистратура)

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
P1	Осуществлять сбор, анализ и обобщение научно-технической информации в области материаловедения и технологии материалов с использованием современных информационно-коммуникационных технологий, глобальных информационных ресурсов
P2	Работать с патентным законодательством и авторским правом при подготовке документов к патентованию и оформлению ноу-хау
P3	Выполнять маркетинговые исследования и анализировать технологический процесс как объекта управления, разрабатывать технико-экономическое обоснование инновационных решений в профессиональной деятельности
P4	Руководить коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
P5	Внедрять в производство технологии получения керамических, металлических материалов и изделий, в том числе наноматериалов, быть готовым к профессиональной эксплуатации современного оборудования и приборов, позволяющих получать и диагностировать материалы и изделия различного назначения.
P6	Разрабатывать новые и модернизировать существующие технологии получения керамических, металлических материалов и изделий, в том числе наноматериалов
P7	Внедрять системы управления качеством продукции в области материаловедения, эксплуатировать оборудование, позволяющее диагностировать материалы и изделия из них, в том числе наноматериалы
P8	Действовать в нестандартных ситуациях, нести социальную и этическую ответственность за принятые решения, выбирать наиболее рациональные способы защиты и порядка в действиях малого коллектива в чрезвычайных ситуациях
P9	Общаться в устной и письменной формах на государственном языке РФ и иностранном языке для решения задач профессиональной деятельности, подготавливать и представлять презентации планов и результатов собственной и командной деятельности, формировать и отстаивать собственные суждения и научные позиции
P10	Самостоятельно осваивать новые методы исследования, изменять научный, научно-педагогический и производственный профиль своей профессиональной деятельности
P11	Применять принципы рационального использования природных ресурсов, основные положения и методы социальные, гуманитарные и экономические подходы при решении профессиональных задач с учетом последствий для общества, экономики и экологии.
P12	Использовать основные категории и понятия общего и производственного менеджмента в профессиональной деятельности

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

Институт физики высоких технологий

Направление подготовки Материаловедение и технологии материалов

Кафедра Материаловедение в машиностроении

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

_____ Панин В. Е.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ4А	Хайруллин Рустам Равильевич

Тема работы:

Исследование влияния ультразвуковой обработки на микроструктуру и механические свойства технического титана BT1-0

Утверждена приказом директора ИФВТ

Приказ №3139/с от 25.04.2016 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).

Объектом исследования являются образцы технически чистого титана марки BT1-0 (0.2 % Al, 0.4 % Zr, 0.3 % Mn, 0.01 % Cr, 0.06 % Si, 0.2 % Fe, 0.02 % Cu и 98.8 % Ti), взятые в двух состояниях: в состоянии поставки (холодная прокатка на 5%, затем отжиг при 650 °С в течение 1ч) и подвергнутые рекристаллизационному отжигу в вакууме при температуре 750 °С в течение 1 часа. Средний размер зерна образцов, находящихся в состоянии поставки составляет 40 мкм, а рекристаллизованных – 100 мкм. Ультразвуковую обработку образцов BT1-0 проводили инструментом, представляющим собой колебательную систему, состоящую из ультразвукового магнитострикционного преобразователя и волновода-концентратора, к торцу которого присоединен сферический ударник из твердого сплава марки ВК8. В процессе ультразвуковой обработки ударник прижимается к обрабатываемой поверхности образцов BT1-0 с силой 200 Н, совершая колебания с частотой ~22 кГц и амплитудой ~40 мкм. Диаметр ударника и скорость его движения вдоль поверхности образцов составляли 10 мм и 0,015 м/с, соответственно. Образцы BT1-0 не токсичны. Стоимость образцов BT1-0 не превышает 5000р.

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	1. Литературный обзор, включающий анализ закономерностей пластической деформации и механических свойств титана при различных видах нагружения, а также основные моменты работ российских и зарубежных исследователей по влиянию ультразвуковой обработки на структуру и свойства различных материалов. 2. Постановка целей и задач исследования 3. Исследование морфологии поверхности, микроструктуры и механических свойств образцов ВТГ-0, подвергнутых ультразвуковой обработке. 4. Обсуждение результатов работы 5. Дополнительные разделы: «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение», «Социальная ответственность». 6. Заключение (выводы) по работе
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Презентация ВКР в Power Point

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Н. А. Гаврикова, старший преподаватель, НИ ТПУ
Социальная ответственность	Ю. М. Федорчук, профессор, НИ ТПУ
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Результаты исследований	

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. лаб. ФПЯ ИФПМ СО РАН	Панин А. В.	Д. ф.-м.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ4А	Хайруллин Рустам Равильевич		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 112 с., 16 рис., 16 табл., 76 источников, 1 прил.

Ключевые слова: титан, ультразвуковая обработка, морфология поверхности, микроструктура, механические свойства

Объектом исследования является (ются) образцы технического титана BT1-0, подвергнутые ультразвуковой обработке

Цель работы – исследование влияния ультразвуковой обработки на морфологию поверхности, микроструктуру и механические свойства образцов технического титана BT1-0

В процессе исследования проводились экспериментальные работы по изучению механизмов формирования поверхностной шероховатости в образцах технически чистого титана BT1-0, подвергнутых ультразвуковой обработке, а также влияния исходного структурного состояния образцов технического титана BT1-0 на изменение их микроструктуры и механических свойств в процессе ультразвуковой обработки.

В результате исследования установлено, что пластическое оттеснение материала ударником и его микровыступами сопровождается формированием навалов различной формы и размеров. Продemonстрировано, что в зависимости от исходного структурного состояния образцов BT1-0 наблюдается различный эффект по увеличению плотности дислокаций и двойников с границами специального типа $\Sigma 7b$ и $\Sigma 11b$ в поверхностных зернах в процессе ультразвуковой обработки. Показана связь между изменением структурных параметров и величиной микротвердости поверхностного слоя образцов BT1-0, подвергнутых ультразвуковой обработке.

Степень внедрения: выполнен эксперимент

Область применения: создание деталей и узлов авиакосмической отрасли, работающих в условиях знакопеременных нагрузок и подверженных усталостному разрушению

Экономическая эффективность/значимость работы полученные результаты будут использованы для исследования влияния ультразвуковой обработки на повышение усталостной долговечности конструкционных материалов

В будущем планируется исследование влияния ультразвуковой обработки на усталостные свойства титановых сплавов

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

предел текучести: Механическое напряжение, при котором в материале начинает развиваться пластическая деформация.

предел прочности: Механическое напряжение, выше которого происходит разрушение материала.

микротвердость: Твердость отдельных участков микроструктуры материала.

область когерентного рассеяния: Определенная область материала, рассеивающая падающее излучение когерентно.

микроискажения: Нарушения в пространственном расположении атомов, возникающие в поликристаллическом материале в пределах одного зерна.

пластическая деформация: Деформация, остающаяся после снятия нагрузки. Связана с перемещением атомов внутри кристаллов на относительно большие расстояния. Вызывает остаточные изменения формы, структуры и свойств без макроскопических изменений сплошности материала.

дислокационное скольжение: Механизм пластической деформации, заключающийся в перемещении дислокации по плоскости скольжения под действием касательных напряжений.

дислокации: Дефекты кристаллического строения, представляющие собой линии, вдоль и вблизи которых нарушено характерное для кристалла правильное расположение атомных плоскостей.

двойникование: Механизм пластической деформации, заключающийся в формировании двойников.

двойник: Дефект кристаллического строения, который может быть получен зеркальным отображением двух частей кристаллической решетки относительно заданной плоскости трансляции (плоскости двойникования).

границы зерен: Дефект кристаллической структуры, представляющий собой поверхность раздела двух зерен (кристаллитов) в поликристаллическом материале.

малоугловые границы: Границы с углом разориентации между двумя зернами менее 15° .

большеугловые границы: Границы с углом разориентации между двумя зернами более 15° .

границы специального типа: Большеугловые границы с меньшей энергией и с высокой плотностью совпадающих узлов; границы, в которых часть атомов соседних зерен занимает позиции, общие для решеток обоих зерен.

Оглавление

	Введение	11
1	Обзор литературы	14
	1.1 Закономерности пластической деформации и механические свойства титана при различных видах нагружения	14
	1.2 Влияние ультразвуковой обработки на структуру и свойства материалов	18
	1.2.1 Влияние ультразвуковой обработки на морфологию поверхности и микроструктуру	18
	1.2.2 Влияние ультразвуковой обработки на прочность и пластичность	20
	1.2.3 Влияние ультразвуковой обработки на усталостные свойства	24
	1.2.4 Влияние ультразвуковой обработки на трибологические свойства	27
	1.2.5 Влияние ультразвуковой обработки на коррозионную стойкость	28
	1.3 Постановка задач	29
2	Объект и методы исследования	32
3	Результаты исследований	35
	3.1 Влияние ультразвуковой обработки на морфологию поверхности образцов BT1-0	35
	3.2 Влияние исходного структурного состояния образцов BT1-0 на изменение микроструктуры их поверхностного слоя в процессе ультразвуковой обработки	36
	3.3 Механические свойства образцов BT1-0, подвергнутых ультразвуковой обработке	41
	3.4 Обсуждение результатов	43
	Задание для раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	51
4	Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	52
	4.1 Потенциальные потребители результатов исследования	52
	4.2 Разработка устава НИР	53

	4.2.1 Цели и результаты проекта	53
	4.2.2 Организационная структура проекта	54
	4.2.3. Ограничения и допущения проекта	55
	4.3 Планирование и график НИР	56
	4.3.1 Иерархическая структура работы	56
	4.3.2 Календарный план проекта	57
	4.3.3 Сетевой график выполнения НИР	58
	4.4 Составление сметы затрат	60
	4.4.1 Затраты на амортизацию оборудования	60
	4.4.2 Затраты на основные и вспомогательные материалы	61
	4.4.3 Затраты на заработную плату	62
	4.4.4 Отчисления на социальные нужды	63
	4.4.5 Затраты на электроэнергию	63
	4.4.6 Смета затрат на НИР	65
	Задание для раздела «Социальная ответственность»	67
5	Раздел «Социальная ответственность»	69
	5.1 Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды	69
	5.1.1 Метеоусловия	70
	5.1.2 Освещенность	71
	5.1.3 Электромагнитные поля	74
	5.1.4 Ультразвук	75
	5.2 Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды	77
	5.2.1 Факторы электрической природы	77
	5.2.2 Факторы пожарной и взрывной природы	80
	5.3 Охрана окружающей среды	82
	5.4 Защита в чрезвычайных ситуациях	82
	5.5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	83

	Заключение	85
	Список публикаций студента	87
	Список использованных источников	90
	Приложение А Раздел 3. Результаты исследований	99
	DVD-диск. Пояснительная записка ВКР (файл «Хайруллин, ВКР» в формате doc) и презентация ВКР (файл «Хайруллин, ВКР» в формате pptx)	

Введение

Наличие высоких удельной прочности, коррозионной стойкости, биоинертности и хладостойкости обуславливает широкое применение титановых сплавов в качестве перспективных конструкционных материалов в авиационно-космической и химической промышленности, а также в медицине [1]. Для повышения механических и физико-химических свойств материалов, в т. ч. и титановых сплавов, активно используются методы поверхностного упрочнения (химико-термическая обработка, поверхностная закалка, обработка электронным пучком, ионная имплантация и др.), среди которых своей относительной простотой технической реализации и низкой себестоимостью выделяется ультразвуковая обработка (УЗО) [2]. В отличие от дробеструйной [3, 4], пескоструйной [5], SMAT [6,7] и других технологий упрочнения, основанных на пластической деформации поверхностных слоев, УЗО позволяет контролировать силу и плотность ударов, а, следовательно, более эффективно обрабатывать поверхность материалов. Кроме этого, ультразвуковая обработка характеризуется способностью обрабатывать труднодоступные локальные области и детали любой формы и размеров.

Хорошо известно, что воздействие индентора, колеблющегося с ультразвуковой частотой, позволяет в широких пределах изменять дислокационную субструктуру материала, измельчать зерна и субзерна до размеров нано- и субмикронного диапазона, формировать сжимающие напряжения в поверхностном слое материала и, тем самым, существенно улучшать физические и механические свойства конструкционных материалов, такие как твердость, предел текучести, износостойкость, усталостная прочность и коррозионная стойкость [8]. Естественно ожидать, что чем выше мощность ультразвукового воздействия, тем более существенно измельчается структура поверхностного слоя металлов и сплавов, а, следовательно, достигаются более высокие физико-химические, механические и другие их свойства. В то же время, интенсивная пластическая деформация поверхностного слоя обрабатываемого материала сопровождается существенным огрублением его

поверхности [9]. Увеличение шероховатости поверхности, в свою очередь, может оказывать негативное влияние на усталостную прочность конструкционных материалов, приводить к ухудшению их свариваемости, увеличивать их сорбционную способность по отношению к водороду, что является актуальной проблемой для материалов, склонных к водородному охрупчиванию таких как титан, цирконий и др.

В работах [10, 11] показано влияние ультразвуковой обработки на морфологию поверхности материалов. Отмечается, что при воздействии ударника на поверхности обрабатываемого материала образуются полукруглые навалы, формируются микротрещины и микроямки. Однако механизм огрубления поверхности, в том числе формирования навалов и микроямок остается неясным.

Необходимо отметить, что эффект по упрочнению от ультразвуковой обработки зависит как от параметров обработки, так и от исходного структурного состояния образцов. В работах [12,13], где в качестве материала для исследований авторами были взяты отожженный сплав $Zr-1\%Nb$ и закаленный сплав $Zr-2.5\%Nb$, было показано, что в процессе ультразвуковой обработки у данных циркониевых сплавов наблюдается различная степень упрочнения. Более мягкий отожженный сплав $Zr-1\%Nb$ характеризуется большим приростом по твердости после ультразвуковой обработки, чем более твердый закаленный сплав $Zr-2.5\%Nb$. Аналогичный эффект большего повышения прочностных характеристик у изначально более мягкого материала после его ультразвуковой обработки установлен в исследованиях с образцами из различных марок стали [14,15,16]. В указанных исследованиях в повышении механических свойств материала отмечается роль дислокационного скольжения, измельчения зерен или выделения вторичных упрочняющих фаз. Однако влияние среднего размера зерна, плотности дислокаций и других структурных параметров материала на закономерности изменения его микроструктуры в процессе ультразвуковой обработки и связанного с этим повышения механической прочности к настоящему времени остается не ясным.

Целью данной работы является исследование влияния ультразвуковой обработки на морфологию поверхности, микроструктуру и механические свойства образцов технического титана BT1-0.

Основными задачами работы являются:

1. Исследование механизмов формирования поверхностной шероховатости в образцах технического титана BT1-0, подвергнутых ультразвуковой обработке.

2. Исследование влияния исходного структурного состояния образцов технического титана BT1-0 на изменение их микроструктуры и механических свойств в процессе ультразвуковой обработки.

1 Обзор литературы

1.1 Закономерности пластической деформации и механические свойства титана при различных видах нагружения

В технически чистом титане имеется 4 системы скольжения: призматическая $\{10\bar{1}0\} < 1\bar{2}10 >$, базисная $\{0001\} < 1\bar{2}10 >$, пирамидальная ($<a>$) $\{10\bar{1}1\} < 1\bar{2}10 >$ и пирамидальная ($<c+a>$) $\{10\bar{1}1\} < 2\bar{1}\bar{1}\bar{3} >$. Призматическая система скольжения является первичной, так как она характеризуется наименьшим критическим скалывающим напряжением. Кроме того, в титане также присутствуют четыре системы двойникования. Две системы двойникования растяжения: T1 $\{10\bar{1}2\} < \bar{1}011 >$ с углом разориентации между осью c исходной кристаллической решетки и осью c решетки двойника 85° и T2 $\{11\bar{2}1\} < \bar{1}\bar{1}26 >$ с углом разориентации 35° , а также две системы двойникования сжатия: C1 $\{11\bar{2}2\} < 11\bar{2}\bar{3} >$ с углом разориентации 65° и C2 $\{10\bar{1}1\} < 10\bar{1}\bar{2} >$ с углом разориентации 54° . В том случае, когда направление максимальных главных напряжений близко к направлению оси c в кристалле или к направлению $<c+a>$, фактор Шмида для систем двойникования высокий [17, 18].

В работе [19] отмечается, что с ростом скорости деформации и среднего размера зерна, а также с уменьшением температуры механизм пластической деформации материалов двойникованием является предпочтительным при монотонном нагружении.

В случае прокатки титана двойникование более выражено при низких степенях деформации. В зернах с высоким фактором Шмида внешнее напряжение, необходимое для двойникования, маленькое. Как следствие, в данных зернах образуются двойники. При дальнейшей деформации происходит измельчение зерен. В результате способность пластической деформации титана путем двойникования уменьшается, так как возрастает внешнее напряжение, необходимое для двойникования. Двойники, сформированные при низких степенях деформации, вызывают переориентацию соседних зерен и, тем самым, активируют системы скольжения, по которым движутся дислокации при

дальнейшей деформации. В результате, при высоких степенях деформации более выраженным в титане является дислокационное скольжение [20].

В работе [21] также показано, что при прокатке технически чистого титана на начальном этапе его пластическая деформация осуществляется преимущественно путем двойникования. При высоких степенях деформации уменьшается средний размер зерна титана. В результате, пластическая деформация продолжается путем скольжения дислокаций. При прокате формируются два типа двойников: растяжения и сжатия. Тип образующихся двойников зависит от того, какие соответствующие напряжения (растягивающие или сжимающие) направлены вдоль оси $\langle 0001 \rangle$ в ГПУ решетке титана. В процессе прокатки на материал действуют сжимающие напряжения в направлении перпендикулярном к прокату и растягивающие напряжения в направлении параллельном прокату. В данной работе исходная текстура ГПУ решетки титана направлена таким образом, что ось $\langle 0001 \rangle$ расположена перпендикулярно к направлению проката и, следовательно, к направлению действия растягивающих напряжений. В результате двойники растяжения не образуются. Однако, по отношению к направлению перпендикулярному к направлению проката (к направлению действия сжимающих напряжений) ось $\langle 0001 \rangle$ ГПУ решетки титана расположена под углом 40° . Как следствие, присутствует компонента оси $\langle 0001 \rangle$, направленная вдоль линии действия сжимающих напряжений. В результате формируются двойники сжатия (первичные двойники). После образования двойников сжатия кристалл в двойникованной части разворачивается таким образом, что ось $\langle 0001 \rangle$ оказывается направленной вдоль направления проката (линии действия растягивающих напряжений). В результате, образуются двойники растяжения (вторичные двойники).

Механизм двойникования характерен для металлов при высоких скоростях нагружения и низких температурах, однако в некоторых ГПУ металлах двойникование развивается при квазистатическом растяжении при комнатной температуре вследствие недостатка систем скольжения. В работе

[22] исследовано влияние скорости нагружения при растяжении и сжатии титановых образцов на долю возникающих в них двойников и средний размер зерна. Установлено, что с ростом скорости деформации увеличивается доля двойников в титановых образцах. Увеличение доли двойников способствует текстурному упрочнению образцов вследствие переориентации кристаллической решетки в зерне, а также упрочнению по механизму Холла-Петча за счет увеличения границ – барьеров для дислокационного скольжения. Кроме того, в работе [22] показано, что повышение скорости деформации в 10000 раз при растяжении титановых образцов приводит к увеличению предела прочности на 100-150 МПа при одновременном уменьшении пластичности на 4-5%. Повышение предела прочности и уменьшение пластичности с ростом скорости нагружения титановых образцов также наблюдалось в работах [23] и [24].

Bouvier с коллегами в [25] исследовали влияние направления нагружения при простом монотонном сдвиге и сдвиге Баушингера на механические свойства, долю двойников и средний размер зерна образцов технически чистого титана. Установлено, что в случае простого монотонного сдвига титановых образцов нагружение под 90° к направлению проката приводит к формированию большей доли двойников растяжения и сжатия, что обуславливает максимальную фрагментацию зерен и высокий предел прочности. При сдвиге Баушингера аналогичные эффекты наблюдаются при нагружении под углом 45° к направлению проката.

В работе [26] также показано, что предел текучести технически чистого титана определяется направлением приложения нагрузки. Установлено, что растяжение образцов титана в направлении перпендикулярном прокату приводит к наибольшему пределу текучести. Кроме того, в данной работе показано, что при растяжении титановых образцов формируются двойники растяжения и сжатия. Однако при последующем сжатии наблюдается исчезновение двойников растяжения (detwinning).

В работе [27] продемонстрировано, что с ростом скорости нагружения в 100 раз предел текучести технически чистого титана увеличивается на 50 МПа. При этом предел текучести оказывается выше, а предел прочности и пластичность – меньше при нагружении под 90° к направлению проката. Повышение предела текучести при растяжении образцов в направлении перпендикулярном прокату связано с тем, что большая часть зерен в данном случае имеет высокий фактор Шмида для пирамидального скольжения, которое, в свою очередь, характеризуется наибольшим критическим скалывающим напряжением. Кроме того, при нагружении под 90° к направлению проката в титановых образцах образуется большее количество двойников, причем в данном случае – двойников растяжения. При нагружении в направлении проката в исследуемых образцах формируются преимущественно двойники сжатия.

По результатам исследований работы [28] установлено, что при высокоскоростном сжатии технически чистого титана в последнем формируются двойники растяжения и сжатия. Общее количество двойников с ростом скорости нагружения возрастает, причем доля двойников сжатия увеличивается, а доля двойников растяжения незначительно уменьшается. При низких степенях деформации (0,11) наблюдается наибольшая доля двойников сжатия, однако с ростом степени деформации (до 0,22) возрастает доля двойников растяжения, а доля двойников сжатия, напротив, уменьшается. Двойники растяжения вызывают переориентацию зерен, тем самым стимулируя дислокационное скольжение.

Guo с коллегами в работе [29] исследовали взаимодействие дислокаций с границами зерен в технически чистом титане, наблюдаемое при одноосном растяжении на 1%. Авторами было установлено три типа взаимодействия дислокаций с границами зерен: торможение дислокации на границе зерна и возникновение концентрации напряжений в соседнем зерне; торможение дислокации на границе зерна без возникновения концентрации напряжений в соседнем зерне и переход дислокации через границу зерна. Тип взаимодействия

определяется геометрическим соответствием осей легкого скольжения в соседних зернах. Если ось легкого скольжения одного зерна совпадает с осью легкого скольжения соседнего зерна (лежит на одной прямой), то дислокация беспрепятственно пересекает границу зерна. В противном случае – она тормозится на границе зерна.

1.2 Влияние ультразвуковой обработки на структуру и свойства материалов

Для повышения механических и физико-химических свойств материалов, в т. ч. и титановых сплавов, активно используются методы поверхностного упрочнения (химико-термическая обработка, поверхностная закалка, обработка электронным пучком, ионная имплантация и др.), среди которых своей относительной простотой технической реализации и низкой себестоимостью выделяется ультразвуковая обработка (УЗО). В отличие от дробеструйной, пескоструйной, SMAT и других технологий упрочнения, основанных на пластической деформации поверхностных слоев, УЗО позволяет контролировать силу и плотность ударов, а, следовательно, более эффективно обрабатывать поверхность материалов. Кроме этого, ультразвуковая обработка характеризуется способностью обрабатывать труднодоступные локальные области и детали любой формы и размеров. В данном подразделе рассмотрены работы по влиянию ультразвуковой обработки на структуру и свойства различных материалов.

1.2.1 Влияние ультразвуковой обработки на морфологию поверхности и микроструктуру

В работах [10,11] показано влияние ультразвуковой обработки на морфологию поверхности материалов. Отмечается, что при воздействии ударника на поверхности обрабатываемого материала образуются полукруглые навалы, формируются микротреки и микроямки. С увеличением количества микроямок улучшаются трибологические характеристики материала (снижается коэффициент трения и повышается износостойкость) [30].

В работах [31,32,33] показано, что отожденные образцы технически чистого титана, подвергнутые родственным УЗО обработкам, деформируются главным образом посредством дислокационного скольжения. Двойникование в данном случае также присутствует, но только при малых степенях пластической деформации. Двойники взаимодействуют друг с другом и с дислокациями, обуславливая фрагментацию структуры и инициируя дислокационное скольжение в новых плоскостях.

В ряде работ [34,35,36,37] показано, что при УЗО достигается нанокристаллический слой 30-50 мкм в толщину. Формирование нанокристаллического слоя зависит как от физико-химических свойств материала, так и от параметров УЗО [38]. Мордюк и Прокопенко [39] изучали микроструктуру различных металлов и сплавов, подвергнутых УЗО, и установили факт измельчения зерна в поверхностном слое исследуемых образцов. Данный слой фрагментированного и более твердого материала повышает его устойчивость к коррозии и износу [40]. Как показали ПЭМ-исследования, средний размер зерен в поверхностном слое образцов, подвергнутых УЗО, составляет 10-100 нм в нержавеющей аустенитной стали AISI 321, до 10 нм в технически чистом титане BT1-0 и 20-100 нм в $\alpha + \beta$ -титановом сплаве BT6.

Закономерности изменения микроструктуры материалов, в том числе и титановых сплавов, при ультразвуковой обработке подробно изучены в работах [12,41]. Убедительно показано, что фрагментация зеренной структуры в процессе УЗО происходит, главным образом, за счет скольжения и/или двойникования. Первоначально образуются единичные дислокации и двойники; далее (с ростом степени деформации) формируются дислокационные стенки (ячейки), которые при дальнейшем увеличении деформации преобразуются в микрополосы с малоугловой разориентировкой. Наконец, при больших степенях деформации микрополосы разбиваются на нанозерна с большеугловой разориентировкой. При этом толщина нанокристаллического поверхностного слоя в конструкционных материалах может достигать 200 мкм [42].

Кроме того, существуют исследования, связанные с изучением влияния исходного структурного состояния материалов на эффект последующей ультразвуковой обработки. Во многих работах продемонстрировано, что ультразвуковая обработка изначально более мягкого материала приводит к большему приросту прочностных характеристик. В работах [12,13], где в качестве материала для исследований авторами были взяты отожженный сплав $Zr-1\%Nb$ и закаленный сплав $Zr-2.5\%Nb$, было показано, что в процессе ультразвуковой обработки у данных циркониевых сплавов наблюдается различная степень упрочнения. Более мягкий отожженный сплав $Zr-1\%Nb$ характеризуется большим приростом по твердости после ультразвуковой обработки, чем более твердый закаленный сплав $Zr-2.5\%Nb$. Аналогичный эффект большего повышения прочностных характеристик у изначально более мягкого материала после его ультразвуковой обработки установлен в исследованиях с образцами из различных марок стали [14,15,16]. В частности, в работе [14] показано, что более существенный прирост пределов текучести и прочности при растяжении наблюдается в образцах из стали ЭК-181, подвергнутых ультразвуковой обработке и предварительной термической обработке, заключающейся в закалке и старении. В свою очередь, ультразвуковая обработка закаленных образцов практически не приводит к повышению прочностных характеристик. В [15] также установлено, что более мягкие отожженные образцы армко железа в результате последующей ультразвуковой обработки характеризуются наибольшим увеличением прочности. И, наконец, в работе [16] показано, что наибольшее увеличение усталостной долговечности в результате ультразвуковой обработки образцов из стали S45C наблюдается при меньшем времени предварительного азотирования. В указанных исследованиях в повышении механических свойств материала отмечается роль дислокационного скольжения, измельчения зерен или выделения вторичных упрочняющих фаз.

1.2.2 Влияние ультразвуковой обработки на прочность и пластичность

В работе [8] исследовано влияние поверхностной ультразвуковой обработки на величину остаточных напряжений, изменения микроструктуры и механические свойства аустенитной стали 304. Ультразвуковая обработка привела к формированию нанокристаллического поверхностного слоя, мартенситному превращению, к образованию высоких сжимающих напряжений (-1400 МПа) и к росту твердости (в 3,5 раз по сравнению с объемным материалом). На глубине 100 мкм от поверхности образовались двойники деформации, которые значительно повышают возможность упрочнения материала, являясь одновременно препятствием для движения дислокаций и источником их генерации. После ультразвуковой обработки в поверхностном слое материала образовалась многослойная микроструктура с двумя упрочненными слоями по краям (с мартенситной фазой) и пластичным внутренним слоем, в котором постепенно меняется объемная доля мартенситной фазы. Такая микроструктура приводит к одновременному росту и прочности и пластичности материала.

Согласно работе [38] на пластине из стали 35 в результате ультразвуковой ударной обработки был сформирован наноструктурный поверхностный слой со средним размером зерна около 10 нм. Толщина пластически деформированного слоя варьируется от нескольких до 100 мкм в зависимости от длительности ультразвуковой обработки. Кроме того, после ультразвуковой ударной обработки значительно увеличилась микротвердость поверхности образцов. При этом с повышением длительности ультразвуковой обработки микротвердость возрастает.

В работе [41] рассматривается проблема одновременного повышения пластичности и прочности титанового сплава Ti-6Al-4V. Предложено решение данной проблемы путем проведения комплексной высокоэнергетической электропульсирующей и ультразвуковой ударной обработок. Предварительная высокоэнергетическая электропульсирующая обработка в 5,5 раз повышает пластичность титанового сплава (при этом прочность практически не снижается). В то время как последующая ультразвуковая ударная обработка

материала более чем в 2 раза увеличивает его микротвердость. Рост пластичности при электропульсирующей обработке объясняется интенсивной диффузией атомов в процессе рекристаллизации. В свою очередь, пластическая деформация поверхностного слоя и фазовые изменения в процессе ультразвуковой ударной обработки приводят к упрочнению поверхности.

Согласно работе [43] ультразвуковая обработка титана ВТ 1-0 позволяет сформировать мелкозернистую структуру поверхности с размером зерна до 2,4 мкм, увеличить значения поверхностной микротвердости до 6000 МПа (исходная микротвердость составляла 2250 МПа) и уменьшить шероховатость до $Ra=0,37$ мкм (исходная шероховатость $Ra=0,53$ мкм).

В работе [44] исследованы закономерности пластической деформации поверхностного слоя титановых сплавов при ультразвуковой поверхностной обработке. Определены оптимальные параметры шероховатости поверхности перед ультразвуковой поверхностной обработкой, позволяющие формировать в поверхностном слое полноценную нанокристаллическую структуру. В результате проведенных исследований показано, что ультразвуковая обработка титана марки ВТ1-0 приводит к модифицированию поверхностного слоя с формированием субзеренной структуры и повышением поверхностной твердости до 4000 МПа. Степень дисперсности структуры и повышение поверхностной твердости существенно зависят от параметров шероховатости предварительной обработки. С увеличением шероховатости величина твердости возрастает, а средний размер элементов субзеренной структуры уменьшается.

В работе [45] по родственной ультразвуковой обработке технологии SMAT в технически чистом титане был сформирован поверхностный слой с различной структурой по глубине. Верхний слой толщиной 30 мкм – сочетание аморфной и нанокристаллической структуры со средним размером зерна менее 30 нм. Далее на глубине от 30 до 90 мкм идет нанокристаллический слой, характеризующийся хаотично ориентированными нанозернами со средним размером 40 нм. И, наконец, внутренняя часть титановых образцов имела

ультрамелкозернистую структуру равноосных зерен с размером зерна в пределах от 50 до 250 нм. Установлено, что данная многослойная структура титана приводит к росту его пределов текучести и прочности при квазистатическом сжатии. Кроме того, показано, что каждый слой титановых образцов характеризуется своим механизмом деформации при сжатии. Так, в процессе деформации сжатием в верхнем слое титановых образцов формируются полосы сдвига, а также увеличивается количество нанокристаллитов. В свою очередь в нанокристаллическом слое титановых образцов при сжатии наблюдается рост зерна от 40 нм в исходном состоянии до 70 нм при 10% деформации и до 100 нм при 30% деформации. Рост зерна объясняется активностью границ зерен, которые сдвигаются под действием напряжений [46]. Сдвиг границ зерен, в свою очередь, связан с образованием и эволюцией клиновых дисклинаций и ротационных дефектов. Данное увеличение зерна при деформации способствует росту пластичности нанокристаллического слоя. И, наконец, в ультрамелкозернистом слое титановых образцов при их сжатии на 30% происходит локализация пластической деформации в виде вытянутых зерен, характеризующихся высокой плотностью дислокаций.

В работе [47] также исследовались механические свойства технически чистого титана, подвергнутого предварительной SMAT-обработке. Показано, что в результате SMAT-обработки в поверхностном слое титановых образцов был сформирован наноструктурированный слой толщиной 15 мкм со средним размером зерна около 30 нм. Данный слой за счет маленького размера зерна и высокой плотности дислокаций характеризуется в два раза более высокой прочностью по сравнению с необработанным крупнозернистым титаном, однако в то же время имеет очень низкую пластичность (менее 2%). В свою очередь, титановые образцы, обработанные по SMAT-технологии, характеризуются неоднородной структурой поверхностного слоя от наноструктуры на поверхности до ультрамелкозернистой структуры в объеме. Такая градиентная структура приводит к тому, что пределы текучести и

прочности при растяжении становятся больше, чем у крупнозернистого необработанного титана на 100 МПа. При этом сохраняется высокая пластичность за счет объемного слоя, в котором происходит деформационное упрочнение за счет активности дислокаций. Дислокации обеспечивают деформационный ресурс материала, предотвращая локализацию деформации и преждевременное разрушение.

1.2.3 Влияние ультразвуковой обработки на усталостные свойства

В работе [48] наблюдалось повышение усталостной долговечности высоко нагруженных спиц литых алюминиевых колес на 21% после ультразвуковой ударной обработки. Рост усталостной долговечности произошел за счет того, что после обработки на поверхности образцов образовались сжимающие напряжения, и увеличилась твердость. Повышение усталостной долговечности позволяет уменьшить толщину спиц, тем самым облегчив конструкцию.

В работе [9] поверхностная ультразвуковая обработка была применена для улучшения усталостной прочности нержавеющей стали марки SUS304 (08X18H10). В результате такой обработки в поверхностном слое уменьшился до нескольких нанометров размер зерна, и произошло мартенситное превращение, что в совокупности привело к существенному увеличению твердости. Данное увеличение поверхностной твердости способствовало повышению усталостной прочности стали. Кроме того, повышение статической нагрузки во время ультразвуковой обработки привело к росту шероховатости поверхности и величины сжимающих напряжений в исследуемых образцах. Также была выбрана оптимальная нагрузка при ультразвуковой обработке (90Н), при которой повышение усталостной долговечности стали наибольшее (на 80 %).

В работе [10] поверхностная ультразвуковая обработка проводилась с целью улучшения поверхностных свойств закаленной и отпущенной стали 45 посредством образования наноструктурированного поверхностного слоя. Варьировались следующие параметры обработки: статическая нагрузка (50, 60

и 70 Н) и плотность обработки (34000 мм^{-2} и 68000 мм^{-2}). Были проанализированы микроструктура, микротвердость и остаточные напряжения в материале. Проведены усталостные испытания на знакопеременный изгиб (вращение образца под нагрузкой). С увеличением числа ударов наблюдается повышение глубины мелкозернистого слоя, а также рост величины сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое материала. При этом предел выносливости увеличивается с 464 Мпа до 550 Мпа. Кроме того, была подобрана максимальная статическая нагрузка ультразвукового воздействия (50 Н), при превышении которой материал разрушается за счет образования приповерхностных трещин.

В работе [49] исследовано влияние повторной ультразвуковой обработки на усталостные свойства сварных швов из стали S690QL (улучшенный европейский аналог марок 16ХГМФТР и 25ХГСП). Установлено, что повторная ультразвуковая обработка с одной стороны может повысить усталостную долговечность стали путем закрытия образовавшихся трещин, однако, с другой стороны способствует дальнейшему разрушению материала из-за воздействия индентора.

В работе [50] для исследования сопротивления усталости стали 08Х18Н10, подвергнутой ультразвуковой ударной обработке, использовалась модель Наварро-Риоса. Для воссоздания остаточных напряжений и вмятин на поверхности при различных входных параметрах применяли метод конечных элементов. Показано, что с ростом скорости ультразвуковой обработки и с увеличением площади обработанной поверхности по отношению к деформированной области возрастают величина и глубина остаточных сжимающих напряжений в материале. Данное обстоятельство уменьшает распространение трещин в материале, т. е способствует повышению его усталостной долговечности.

В работе [16] исследовано влияние ультразвуковой обработки на усталостную прочность азотированной стали S45C в зависимости от времени азотирования и от плотности ультразвуковой обработки. Установлено, что

ультразвуковая обработка азотированной стали приводит к уменьшению шероховатости поверхности и размера зерна, а также к увеличению микротвердости и величины сжимающих напряжений. С увеличением плотности ультразвуковой обработки величина микротвердости и шероховатости поверхности возрастают, а сжимающие напряжения уменьшаются. Ультразвуковая обработка также способствует пластической деформации поверхностного слоя материала. При этом более толстый пластически деформированный поверхностный слой после ультразвуковой обработки получен при меньшем времени предварительного азотирования.

В работе [51] изучено влияние ударной ультразвуковой обработки на характер растрескивания прокорродировавших алюминиевых сплавов при испытаниях на усталостную долговечность. В частности показано, что ультразвуковая обработка позволяет существенно повысить усталостную долговечность материала за счет изменения механизма растрескивания. При этом изменение механизма растрескивания определяется уровнем коррозии материала. Так, ультразвуковая обработка слабо прокорродировавших образцов позволила изменить механизм формирования трещин с межкристаллитного на механизм истирания, что способствовало существенному росту усталостной долговечности. В свою очередь, ультразвуковая обработка сильно прокорродировавших образцов не меняет механизма растрескивания, что приводит лишь к незначительному повышению усталостной долговечности.

В работе [52] исследовано влияние ультразвуковой поверхностной обработки на приповерхностную микроструктуру, уровень остаточных напряжений и усталостную прочность аустенитной стали AISI 304 (08X18H10). Показано, что результаты ультразвуковой поверхностной обработки сопоставимы с результатами других методов механической обработки поверхности: глубокой прокатки и дробеструйной обработки. Во-первых, в поверхностном слое материала возрастает величина сжимающих напряжений, и наблюдается эффект деформационного упрочнения. При этом глубина деформационного упрочнения определяется не только характерными

особенностями метода поверхностной обработки, но и параметрами процесса обработки. Во-вторых, в результате поверхностной обработки происходит фазовое превращение аустенита в мартенсит.

В работе [53] исследовано влияние поверхностной ультразвуковой обработки на усталостные свойства стали S45C. Варьировалось число ударов на единицу площади (34000, 45000 и 68000 ударов/мм²). В ходе исследований выявлено, что с ростом числа ударов на единицу площади увеличиваются глубина нанокристаллического слоя (от 2 мкм при 34000 ударов/мм² до 30 мкм при 68000 ударов/мм²), микротвердость поверхности (в 2 раза по сравнению с объемом материала при 68000 ударов/мм²), величина сжимающих напряжений, а также уменьшается шероховатость поверхности. Кроме того, с ростом числа ударов на единицу площади возрастает усталостная прочность материала (более, чем на 33% при 68000 ударов/мм² по сравнению с необработанной сталью). Установлено, что нанокристаллический поверхностный слой, сформированный в процессе ультразвуковой обработки, замедляет образование усталостных трещин.

1.2.4 Влияние ультразвуковой обработки на трибологические свойства

В работе [42] исследуется влияние поверхностной ультразвуковой обработки на механические и трибологические свойства спеченного медного сплава. Установлено, что образцы после обработки характеризуются повышенными механическими свойствами, более высокой износостойкостью и пониженными значениями коэффициента трения по сравнению с необработанными образцами. Повышение механических свойств после ультразвуковой обработки связано с образованием наноструктурного поверхностного слоя толщиной около 200 мкм и измельчением зерен. Улучшение трибологических свойств (снижение коэффициента трения и увеличение износостойкости) объясняются увеличением твердости, снижением шероховатости поверхности и пористости образцов, а также формированием волнистой поверхностной структуры.

В работе [54] поверхностной ультразвуковой обработке были подвергнуты образцы из магниевых сплавов AZ91D. В результате обработки удалось сформировать в приповерхностном слое образцов толщиной 100 мкм нанокристаллическую структуру со средним размером зерна 40-60 нм. Кроме того, после ультразвуковой обработки твердость образцов постепенно увеличивается от 230 HV (на расстоянии 100 мкм от поверхности) до 295 HV (на поверхности образцов). Установлено, что ультразвуковая обработка приводит к снижению коэффициента трения и скорости износа образцов на 23 и 30% соответственно по сравнению с необработанными образцами. При этом данное снижение возрастает с ростом нагрузки ультразвуковой обработки.

В работе [55] исследовано влияние поверхностной ультразвуковой обработки на структуру, механические и трибологические свойства образцов из карбида кремния SiC. Установлено, что ультразвуковая обработка способствует улучшению трибологических свойств (более низкий коэффициент трения и более высокая износостойкость), уменьшению пористости, снижению шероховатости поверхности, а также увеличению поверхностной твердости и трещиностойкости образцов.

Аналогичный эффект улучшения трибологических свойств материалов после их поверхностной ультразвуковой обработки установлен в исследованиях с нержавеющей сталью AISI 304 [56], а также титановыми сплавами BT1-0 и BT6 [57,58].

1.2.5 Влияние ультразвуковой обработки на коррозионную стойкость

В работах [12,13] поверхностная ультразвуковая обработка циркониевых сплавов привела к формированию ультрамелкозернистого поверхностного слоя (в верхнем слое толщиной 10 мкм средний размер зерна уменьшился до 100 нм после ультразвуковой обработки в течение 4 мин) и ярко выраженной текстуры с высокой долей границ специального типа, а также к уменьшению шероховатости поверхности и к росту величины сжимающих напряжений. Установлено, что одновременно с уменьшением размера зерна снижается

плотность дислокаций (вследствие процессов динамической рекристаллизации). Показано, что за счет формирования сжимающих напряжений и ярко выраженной текстуры с низкоэнергетическими границами специального типа в поверхностном слое, а также уменьшения шероховатости поверхности в процессе ультразвуковой обработки материала происходит увеличение его коррозионной стойкости. Кроме того, формирование ультрамелкозернистой структуры в поверхностном слое образцов Zr, подвергнутых ультразвуковой обработке, способствует более легкому окислению и образованию защитной пассивирующей пленки из ZrO_2 , которая дополнительно улучшает коррозионную стойкость. Аналогичный эффект повышения коррозионной стойкости наблюдался этими же авторами при ультразвуковой обработке нержавеющей стали AISI-321 [34] и сплава Co-Cr-Mo [59].

Границы зерен первыми подвержены коррозии, так как они имеют высокий уровень энергии и химически активны. В процессе ультразвуковой обработки сварных соединений в зоне сварного шва за счет высоких сжимающих напряжений образуется деформированный слой плотно сжатого материала, который является устойчивым против химически активных растворов [60]. В соответствии с этим обстоятельством, взаимодействие между границами зерен и коррозионной средой будет минимальным. В работе [61] установлено, что ультразвуковая обработка сварных соединений из стали St-304 приводит к существенному улучшению их коррозионной стойкости.

1.3 Постановка задач

Проведенный обзор литературы показал, что механизмы пластической деформации технически чистого титана при различных видах механического нагружения достаточно хорошо изучены и описаны. В титане имеется четыре системы скольжения: призматическая, базисная и две пирамидальных ($\langle a \rangle$ и $\langle c+a \rangle$), а также четыре системы двойникования: две системы двойникования растяжения (T1 и T2) и две – сжатия (C1 и C2).

Во всем мире широко исследуется влияние поверхностной ультразвуковой обработки на структуру и свойства различных материалов. Это говорит о том, что данные исследования являются актуальными. Действительно, многими исследователями установлено положительное влияние ультразвуковой поверхностной обработки на механические свойства материалов (увеличение усталостной долговечности, износостойкости, предела прочности, твердости). При этом благодаря своей технической простоте себестоимость метода ультразвуковой обработки значительно ниже других методов поверхностного упрочнения (химико-термическая обработка, нанесение защитных покрытий, обработка электронным пучком, ионная имплантация).

В работах показано влияние ультразвуковой обработки на морфологию поверхности материалов. Отмечается, что при воздействии ударника на поверхности обрабатываемого материала образуются полукруглые навалы, формируются микротреки и микроямки. Однако механизм огрубления поверхности, в том числе формирования навалов и микроямок, остается неясным. Кроме того, на сегодняшний день известно, что в процессе ультразвуковой обработки происходит фрагментация зеренной структуры вплоть до образования наноструктуры, главным образом, за счет скольжения и/или двойникования. При этом толщина нанокристаллического поверхностного слоя в конструкционных материалах может достигать 200 мкм. Подробно описано влияние ультразвуковой обработки на шероховатость поверхности, структуру и механические свойства материалов в зависимости от параметров процесса обработки (длительности, нагрузки, числа ударов на единицу площади и др.). Однако влияние среднего размера зерна, плотности дислокаций и других структурных параметров материала на закономерности изменения его микроструктуры в процессе ультразвуковой обработки и связанного с этим повышения механической прочности к настоящему времени остается не ясным. Целью данной работы является исследование влияния

ультразвуковой обработки на морфологию поверхности, микроструктуру и механические свойства образцов технического титана BT1-0.

Основными задачами работы являются:

1. Исследование механизмов формирования поверхностной шероховатости в образцах технического титана BT1-0, подвергнутых ультразвуковой обработке.

2. Исследование влияния исходного структурного состояния образцов технического титана BT1-0 на изменение их микроструктуры и механических свойств в процессе ультразвуковой обработки.

2 Объект и методы исследования

В качестве материала для исследований были выбраны пластины из технически чистого титана марки BT1-0 (0.2 % Al, 0.4 % Zr, 0.3 % Mn, 0.01 % Cr, 0.06 % Si, 0.2 % Fe, 0.02 % Cu и 98.8 % Ti). Размеры пластин: 100 мм×100 мм×1 мм. Было исследовано две партии пластин. Первая партия пластин BT1-0 находилась в состоянии поставки (холодная прокатка на 5%, затем отжиг при 650 °С в течение 1ч). Вторая партия пластин BT1-0 была подвергнута рекристаллизационному отжигу в вакууме при температуре 750 °С в течение 1 часа. Средний размер зерна титановых пластин, находящихся в состоянии поставки составлял 40 мкм, а рекристаллизованных пластин – 100 мкм (рисунок 1).

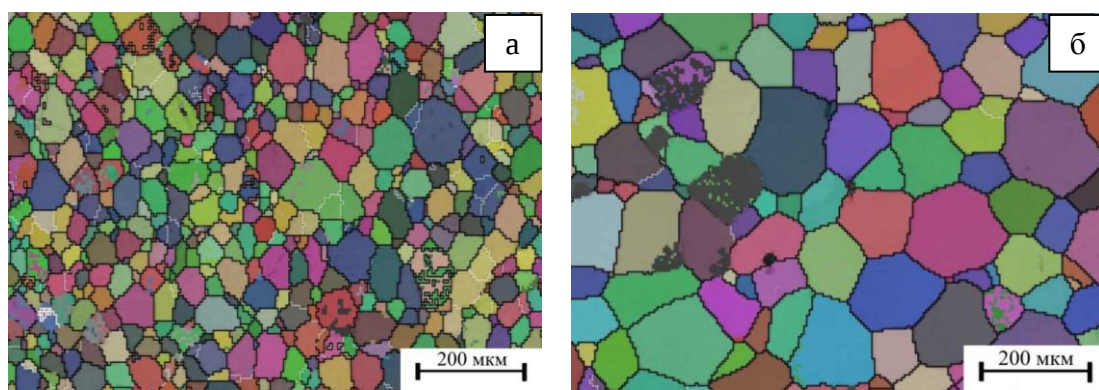


Рисунок 1 – EBSD – карты микроструктуры поверхности технически чистого титана BT1-0 в состоянии поставки (а) и после рекристаллизационного отжига (б)

Ультразвуковую обработку титановых пластин проводили инструментом, представляющим собой колебательную систему, состоящую из ультразвукового магнитострикционного преобразователя и волновода-концентратора, к торцу которого присоединен сферический ударник из твердого сплава марки ВК8 (рисунок 2). В процессе ультразвуковой обработки ударник прижимается к обрабатываемой поверхности титановых пластин с силой 200 Н, совершая колебания с частотой ~22 кГц и амплитудой ~40 мкм. Диаметр ударника и скорость его движения вдоль пластин составляли 10 мм и 0,015 м/с, соответственно.

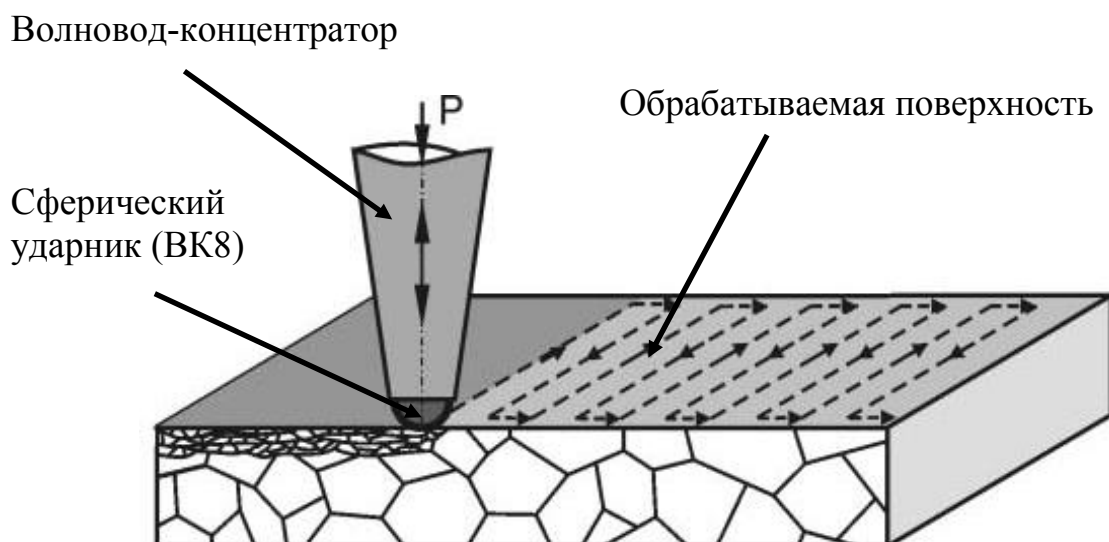


Рисунок 2 – Схема поверхностной обработки плоских заготовок из технического титана ВТ 1-0 ударником, колеблющемся с ультразвуковой частотой

Для исследований морфологии поверхности и микроструктуры титановые пластины были разрезаны путем электроискровой резки на образцы размерами 10 мм×10 мм×1 мм. Часть образцов была механически сполирована, другие образцы были исследованы сразу после ультразвуковой обработки.

Морфологию поверхности образцов из титана ВТ1-0 исследовали с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) Solver HV и оптического профилометра Zygo New View 6200. Микроструктуру образцов титана ВТ1-0 исследовали с помощью оптического микроскопа Zeiss Axiovert 40 MAT и сканирующего электронного микроскопа LEO EVO 50 с системой регистрации дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD) Oxford Instruments CHANNEL5. Поверхность и боковая грань образцов шлифовались на абразивных шкурках, затем полировались алмазной пастой и подвергались химическому травлению раствором плавиковой и азотной кислот (2% HF и 2% HNO₃). Для исследований на сканирующем электронном микроскопе образцы из ВТ1-0 дополнительно подвергались электрохимической полировке. Рентгеноструктурные исследования образцов выполняли на дифрактометре ДРОН-7 с использованием CoK_α -излучения. Дефектную субструктуру

исследуемых образцов определяли методами дифракционной электронной микроскопии тонких фольг на просвечивающем электронном микроскопе JEM-2100. Фольги изготавливались из пластин путем механического шлифования до толщины 0.2 мм, а затем электрополировкой в растворе утоняли до 200 нм.

Измерения микротвердости H_{μ} исследуемых образцов выполняли на микротвердомере “ПМТ-3” с нагрузкой 50 г. Одноосное квазистатическое растяжение образцов со скоростью 0,3 мм/с проводилось на универсальной испытательной машине «Instron 5582». Для проведения испытаний на растяжение титановые пластины были разрезаны путем электроискровой резки на образцы стандартных размеров (рисунок 3).

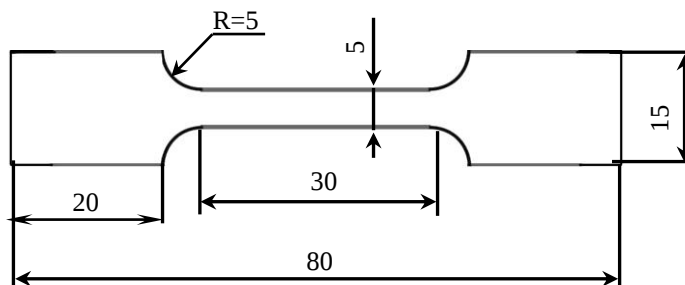


Рисунок 3 – Чертеж образца из технически чистого титана марки ВТ 1-0 для испытаний на одноосное растяжение

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ4А	Хайруллин Рустам Равильевич

Институт	ИФВТ	Кафедра	ММС
Уровень образования	магистр	Направление/специальность	Материаловедение и технологии материалов

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	Потенциальные потребители результатов исследования
2. Разработка устава научно-технического проекта	1. Цели и результаты проекта 2. Организационная структура проекта 3. Ограничения и допущения проекта 4. Иерархическая структура работ 5. Календарный план проекта 6. Сетевой график проекта
3. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Бюджет научно – технического исследования (НТИ) 1. Затраты на амортизацию оборудования 2. Затраты на основные и вспомогательные материалы 3. Затраты на заработную плату 4. Отчисления на соц. нужды 5. Затраты на электроэнергию 6. Прочие накладные расходы
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Расчет фактической рентабельности проекта

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Потенциальные потребители результатов исследования
2. Иерархическая структура работ
3. Календарный план проведения исследования
4. Сетевой график проведения исследования
5. Бюджет проекта

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Гаврикова Н.А.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ4А	Хайруллин Рустам Равильевич		

4 Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

4.1 Потенциальные потребители результатов исследования

В таблице 2 представлены основные потребители результатов исследований в зависимости от их вида.

Таблица 2 – Классификация потребителей результатов НИР

Вид исследований	Потребители	Цели приобретения
Фундаментальные и поисковые исследования	Государство, общество	Развитие науки, общественный прогресс, пополнение существующей базы знаний, создание заделов для прикладных исследований
Прикладные исследования	Государство, региональные структуры	Удовлетворение общественных нужд (оборона, образование, экология и т.п.), поддержание престижа и авторитета на международном уровне
	Корпорации, промышленные предприятия, фирмы	Разработка новых продуктов, повышение конкурентоспособности, максимизация прибыли
Разработки	Государство, региональные структуры	Обеспечение общественных нужд, поддержание национальных интересов
	Корпорации, промышленные предприятия, средний и малый бизнес	Производство новых продуктов, повышение конкурентоспособности, получение экономического эффекта

Поскольку данная работа относится к фундаментальным, то потребителями являются государство и общество.

4.2 Разработка устава НИР

4.2.1 Цели и результаты проекта

Таблица 3 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Российский научный фонд (РНФ)	Выполнение условий договора по НИР, получение отчета по НИР
ИФПМ СО РАН	Отчисления в бюджет организации из средств РНФ. Публикации, аффилированные с ИФПМ СО РАН
Сотрудники лаборатории Физики поверхностных явлений ИФПМ СО РАН	Оплачиваемая работа по НИР. Публикации.
Дипломник	Оплачиваемая работа по НИР, Возможность написать и защитить магистерскую диссертацию. Публикации.
ТПУ	Публикации, аффилированные с ТПУ. Защита магистерской диссертации.

Таблица 4 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	Исследовать влияние ультразвуковой обработки на микроструктуру и механические свойства технического титана BT1-0 в срок с сентября 2014 г по июнь 2016 г. Защитить магистерскую диссертацию в ТПУ 24.06.2016 г.
Ожидаемые результаты проекта:	Магистерская диссертация
Критерии приемки результата проекта:	Публикации результатов работы в индексируемых отечественных и зарубежных журналах. Участие в конференциях.
Требования к результату проекта:	Требование:
	Успешная защита магистерской диссертации в ТПУ

4.2.2 Организационная структура проекта

Таблица 5– Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудо- затраты, час.
1	Панин Алексей Викторович, ИФПМ СО РАН, зав. лаб.	Руководитель	Отвечает за реализацию проекта, координирует деятельность участников проекта.	312
2	Козельская Анна Ивановна, ИФПМ СО РАН, мнс.	Ответственный исполнитель	Выполняет работы по проекту. Проводит исследования, пишет статьи.	208
3	Хайруллин Рустам Равильевич, ТПУ, магистрант	Ответственный исполнитель	Выполняет работы по проекту. Проводит исследования, пишет статьи и магистерскую диссертацию.	1160
4	РНФ	Заказчик	Осуществляет укрупненный анализ проекта по показателям сроков, освоению затрат и финансированию. Проводит экспертную оценку результатов проекта.	30
5	ТПУ	Заказчик	Проводит экспертную оценку результатов проекта.	30
ИТОГО:				1740

4.2.3. Ограничения и допущения проекта

Таблица 6 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
3.1. Бюджет проекта	500000р
3.1.1. Источник финансирования	Российский научный фонд (РНФ)
3.2. Сроки проекта:	Сентябрь 2014 г – июнь 2016 г.
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	01.09.2014
3.2.2. Дата завершения проекта	24.06.2016
3.3. Прочие ограничения и допущения	Ограничение по времени использования научного оборудования (1 раз в месяц на растровом электронном микроскопе). Ограничение времени работы участников проекта (не более 20 часов в неделю)

4.3 Планирование и график НИР

4.3.1 Иерархическая структура работы

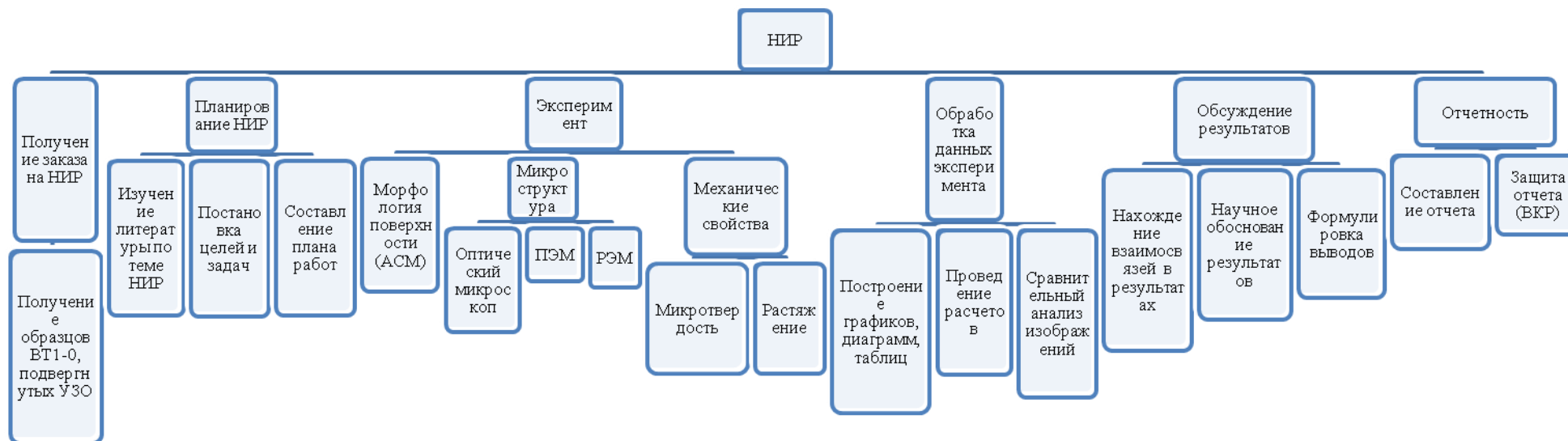


Рисунок 13 – Иерархическая структура НИР

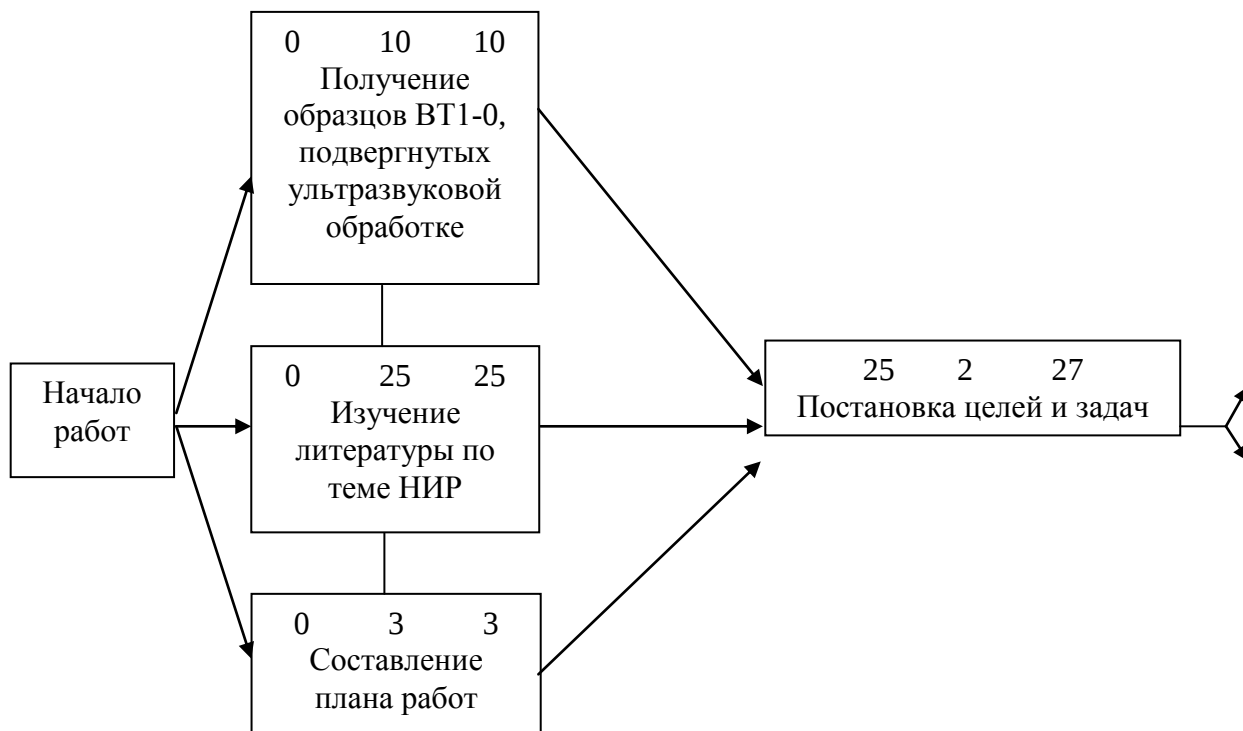
4.3.2 Календарный план проекта

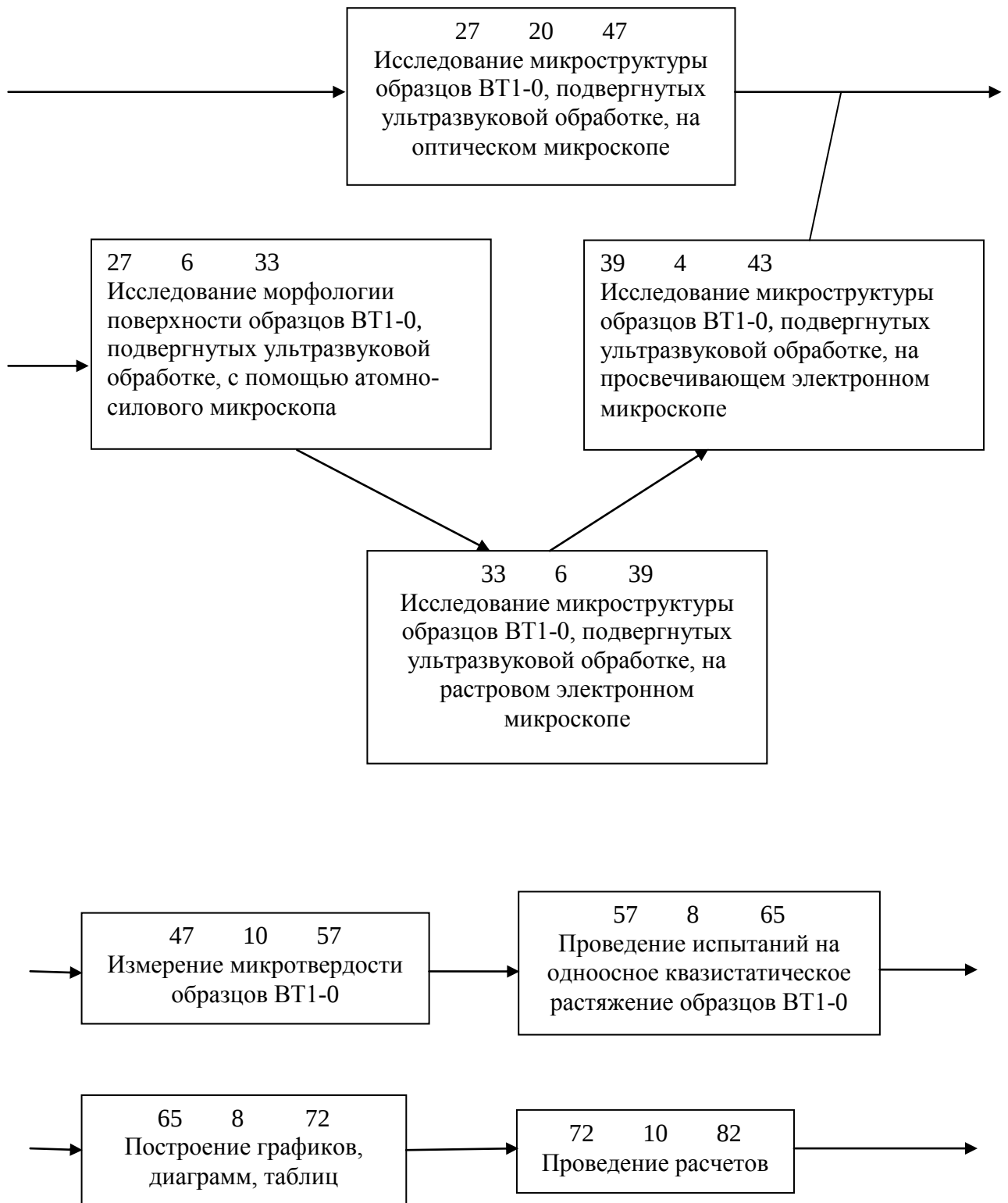
Таблица 7 – Календарный план проекта

Название работы	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников (ФИО ответственных исполнителей)
Получение образцов технического титана BT1- 0, подвергнутых ультразвуковой обработке	10	01.09.2014	12.09.2014	Козельская А. И. (мнс)
Изучение литературы по теме НИР	25	01.09.2014	03.10.2014	Хайруллин Р. Р. (инж)
Составление плана работ	3	01.09.2014	03.09.2014	Панин А. В. (зав. лаб.)
Постановка целей и задач	2	06.10.2014	08.10.2014	Хайруллин Р. Р. (инж), Панин А. В. (зав. лаб.)
Исследование микроструктуры образцов технического титана BT1- 0, подвергнутых ультразвуковой обработке, на оптическом микроскопе	20	09.10.2014	07.11.2014	Хайруллин Р. Р. (инж)
Исследование морфологии поверхности образцов технического титана BT1- 0, подвергнутых ультразвуковой обработке, с помощью атомно- силового микроскопа	6	09.10.2014	16.10.2014	Козельская А. И. (мнс)
Исследование микроструктуры образцов технического титана BT1- 0, подвергнутых ультразвуковой обработке, на растровом электронном микроскопе	6	17.10.2014	24.10.2014	Козельская А. И. (мнс)
Исследование микроструктуры образцов технического титана BT1- 0, подвергнутых ультразвуковой обработке, на просвечивающем электронном микроскопе	4	27.10.2014	30.10.2014	Козельская А. И. (мнс)
Измерение микротвердости образцов BT1-0, подвергнутых ультразвуковой обработке	10	10.11.2014	21.11.2014	Хайруллин Р. Р. (инж)

Название работы	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников (ФИО ответственных исполнителей)
Проведение испытаний на одноосное квазистатическое растяжение образцов ВТ1-0, подвергнутых ультразвуковой обработке	8	24.11.2014	03.12.2014	Хайруллин Р. Р. (инж)
Построение графиков, диаграмм, таблиц	8	04.12.2014	15.12.2014	Хайруллин Р. Р. (инж)
Проведение расчетов	10	16.12.2014	29.12.2014	Хайруллин Р. Р. (инж)
Сравнительный анализ изображений	6	20.11.2015	27.11.2015	Хайруллин Р. Р. (инж)
Научное обоснование результатов	20	30.11.2015	25.12.2015	Хайруллин Р. Р. (инж), Панин А. В. (зав. лаб.)
Нахождение взаимосвязей в результатах	10	30.11.2015	11.12.2015	Хайруллин Р. Р. (инж), Панин А. В. (зав. лаб.)
Формулировка выводов	4	14.12.2015	17.12.2015	Панин А. В. (зав. лаб.)
Составление отчета	25	01.02.2016	10.03.2016	Хайруллин Р. Р. (инж)
Защита отчета (ВКР)	1	24.06.2016	24.06.2016	Хайруллин Р. Р. (инж)

4.3.3 Сетевой график выполнения НИР





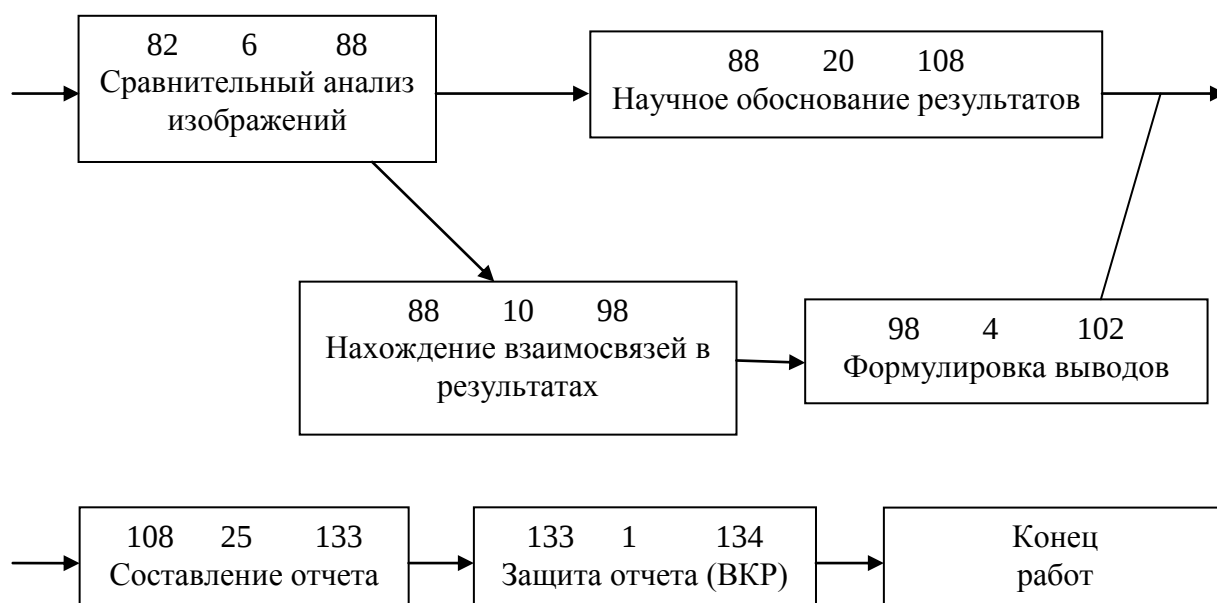


Рисунок 14 – Сетевой план-график выполнения НИР

4.4 Составление сметы затрат

Смета затрат будет составлена по следующим статьям:

1. Амортизация оборудования;
2. Основные и вспомогательные материалы;
3. Заработная плата:
 - 3.1 Основная заработная плата;
 - 3.2 Дополнительная заработная плата;
4. Отчисления на социальные нужды;
5. Электроэнергия;
6. Прочие накладные.

4.4.1 Затраты на амортизацию оборудования

Затраты на амортизацию оборудования рассчитываются по формуле:

$$З_{об} = (\Pi \cdot F_{\phi}) / (F_n \cdot F_{cc}),$$

где Π – цена оборудования, р.; F_n – номинальный фонд времени (рабочее время в году), ч; F_{cc} – срок службы оборудования, год; F_{ϕ} – фактическое время занятости оборудования в НИР, ч. $F_n = 365 - 104 - 11 = 250$ дней = 2000 ч.

Вычисленная амортизация оборудования представлена в таблице 8. Данные взяты на основе отчета лаборатории.

Таблица 8 – Затраты на амортизацию оборудования

№	Наименование оборудования	Ц, р.	Е _{сс} год	Е _ф , ч.	З _{об} , р.
1	Атомно-силовой микроскоп Solver HV	10000000	20	24	6000
2	Оптический микроскоп Zeiss Axiovert	1000000	10	160	8000
3	Растровый электронный микроскоп LEO EVO 50	8000000	20	40	8000
4	Просвечивающий электронный микроскоп JEM-2100	7000000	20	40	7000
5	Испытательная машина INSTRON	2000000	20	40	2000
6	Микротвердомер ПМТ-3	120000	15	40	160
7	Установка для ультразвуковой обработки	200000	20	40	200
8	Установка для вырезки образцов	1000000	20	80	2000
9	Компьютер	30000	8	900	1687,5
ИТОГО:					35047,5

4.4.2 Затраты на основные и вспомогательные материалы

В данной работе в качестве исходного основного материала использовался лист технического титана марки BT1-0 размерами 1×1000×2000 мм. Цена за кг с учетом транспортных расходов составляет 2000р.

Приобретенные основные и вспомогательные материалы приведены в таблице 9. Данные взяты на основе отчета лаборатории.

Таблица 9 – Основные материалы и комплектующие изделия

№	Материал	Единица материала	Цена, р./ед.	Кол - во, ед.	Затраты на НИР, р.
1	Лист из титана BT1-0	кг	2000	2	4000
2	Наждачная бумага	упаковка	1000	1	1000
3	Алмазная паста	тюбик	300	1	300
4	Спирт технический	л	120	3	360
5	Вспомогательные материалы				400
Итого:					6060
Неучтенные расходы 1%					60
Всего:					6120

4.4.3 Затраты на заработную плату

Для выполнения данной работы требуется 3 исполнителя – заведующий лабораторией (зав. лаб.), младший научный сотрудник (м.н.с) и инженер лаборатории (инж).

Исходными нормативами заработной платы данных категорий работающих является оклад, определяющий уровень месячной заработной платы в зависимости от объема и ответственности работ.

Оклад рассчитывают по следующему выражению:

$$L_o = T_c \cdot T_{pi}$$

где T_c – тарифная ставка (данные НИИ ИФПМ СО РАН);

T_{pi} — фактически отработанное время (Таблица 7).

Основную заработную плату рассчитывают следующим образом:

$$L_{осн} = L_o + 0,3 \cdot L_o$$

где L_o - оклад;

$0,3 \cdot L_o$ - районный коэффициент (30% L_o).

Дополнительную заработную плату рассчитываются по формуле:

$$L_{доп} = 0,2 \cdot L_{осн}$$

Вычисленные затраты на заработную плату представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Затраты на заработную плату

№	Статьи	Зав. Лаб.	МНС	инж
1	T_c , р./день	1600	880	570
2	T_{pi} , дн	39	26	145
3	L_o , р.	62400	22880	82650
4	$0,3 * L_o$, р.	18720	6864	24795
5	$L_{осн}$, р.	81120	29744	107445
6	$L_{доп}$, р.	16224	5948,8	21489
7	$\Sigma (L_{осн} + L_{доп})$, р.	97344	35692,8	128934

Основная заработная плата составит: $81120 + 29744 + 107445 = 218309$ р.

Дополнительная заработная плата составит: $16224 + 5948,8 + 21489 = 43661,8$ р.

Итого фонд оплаты труда: $97344 + 35692,8 + 128934 = 261970,8$ р.

4.4.4 Отчисления на социальные нужды

На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году вводится пониженная ставка для расчета отчислений во внебюджетные фонды – 27,1% от фонда оплаты труда.

Таким образом, затраты на страховые отчисления составят:

$$261970,8 \cdot 0,271 = 70994,09 \text{ р.}$$

4.4.5 Затраты на электроэнергию

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$\mathcal{E} = \mathcal{C} \times N \times n \times t_{\text{зан.ч}}$$

где $\mathcal{C}$ — стоимость 1 кВт•ч электроэнергии, р.;

N — мощность оборудования, кВт;

n — количество единиц оборудования одного вида, ед.;

$t_{\text{зан.ч}}$ — время занятости оборудования, ч.;

Вычисленные затраты на электроэнергию представлены в таблице 11

Таблица 11 – Затраты на электроэнергию

	Наименование оборудования	Цена, Ц, р.	N, кВт	n	$t_{\text{зан.ч}}$, ч.	Затраты, р.
1	Атомно-силовой микроскоп Solver HV	4,36	1,5	1	24	156,96
2	Оптический микроскоп Zeiss Axiovert	4,36	0,7	1	160	488,32
3	Растровый электронный микроскоп LEO EVO 50	4,36	2	1	40	348,8
4	Просвечивающий электронный микроскоп JEM-2100	4,36	2	1	40	348,8
5	Испытательная машина INSTRON	4,36	2	1	40	348,8
6	Микротвердомер ПМТ-3	4,36	0,6	1	40	104,64
7	Установка для ультразвуковой обработки	4,36	0,3	1	40	52,32
8	Установка для вырезки образцов	4,36	0,6	1	80	209,28
9	Компьютер	4,36	0,3	1	900	1177,2
	Итого:					3235,12

4.4.6 Смета затрат на НИР

Теперь сложим все прямые затраты на исследование (Таблица 12).

Таблица 12 – Прямые затраты

№	Затраты	Сумма, р.
1	Основные и вспомогательные материалы	6120
2	Основная заработная плата	218309
3	Дополнительная заработная плата	43661,8
4	Страховые отчисления	70994,09
Итого:		339084,89

Расшифровка накладных расходов представлена в таблице 13 (данные НИИ ИФПМ).

Прочие накладные расходы составят 50% от основной заработной платы, т.е.

$$0,5 \times 218309 = 109154,5 \text{ р.}$$

Таблица 13 – Накладные расходы

№	Затраты	Сумма, р.
1	Амортизация оборудования	35047,5
2	Электроэнергия	3235,12
3	Прочие	109154,5
Итого:		147437,12

Общие затраты на исследование будут равны сумме прямых и накладных затрат:

$$339084,89 + 147437,12 = 486522,01 \text{ р.}$$

Значит, при проведении НИР необходимо затратить 486522,01 р.

Составим смету затрат на НИР (Таблица 14).

Таблица 14 – Смета затрат на НИР

№	Элементы затрат	Сумма, р.	%
1	Заработная плата	261970,8	53,8
2	Страховые отчисления	70994,09	14,6
3	Затраты на материалы	6120	1,3
4	Амортизация оборудования	35047,5	7,2
5	Затраты на электроэнергию	3235,12	0,7
6	Прочие накладные расходы	109154,5	22,4
8	ИТОГО: себестоимость S	486522,01	100
9	Плановая прибыль (рентабельность P=25%)	121630,5	
10	Цена выполнения НИР	608152,51	
11	НДС (18%)	109467,45	
12	Всего с НДС	717619,96	

Таким образом, в данном разделе работы проведено экономическое обоснование проведенных исследований:

- рассчитана себестоимость НИР, которая составила 486522,01 р.;
- рассчитана договорная цена на проведение НИР с учетом рентабельности в 25% и НДС (18%), которая составила 717619,96 р.;
- рассчитано время проведения НИР – 134 дня.

Учитывая, что размер гранта составляет 500000р, фактическая рентабельность НИР $P_{\phi} = (500000 - 486522,01) \cdot 100 / 486522,01 = 2,8 \%$

Список публикаций студента

1. Panin A. V., Kazachenok M.S., Kozelskaya A.I., Hairullin R.R., Sinyakova E. A. Mechanisms of surface roughening of commercial purity titanium during ultrasonic impact treatment // Materials Science and Engineering A. – 2015. – V. 647. – P. 43-50.
2. R R Hairullin, A I Kozelskaya, A V Panin and M S Kazachenok. Microstructure and mechanical properties of CP-Ti subjected to UIT // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol.93 – Article number 012050. – p. 1-4.
3. Anna Kozelskaya, Alexey Panin, Marina Kazachenok, Rustam Hairullin, Elena Sinyakova, Yurii Pochivalov, and Olga Perevalova. Structure fragmentation of a surface layer of commercial purity titanium during ultrasonic impact treatment // AIP Conference Proceedings. – 2015. – V.1683. – №020100. – p. 1-4.
4. Хайруллин Р. Р., Панин А. В., Козельская А. И., Казаченок М. С., Синякова Е. А., Почивалов Ю. И., Перевалова О. Б. Влияние исходной зеренной структуры технически чистого титана на эффект ультразвуковой обработки // Тезисы докладов Международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций». – ИФПМ СО РАН, 2015. – С. 228-229.
5. Козельская А. И., Панин А. В., Казаченок М. С., Синякова Е. А., Хайруллин Р. Р., Почивалов Ю. И. Закономерности измельчения структуры поверхностного слоя титана ВТ1-0 в процессе ультразвуковой обработки // Тезисы докладов Международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций». – ИФПМ СО РАН, 2015. – С. 457-458.
6. Хайруллин Р. Р. Ультразвуковая обработка мелко- и крупнозернистого технически чистого титана // сборник тезисов докладов III Всероссийского конкурса научных докладов студентов «Функциональные материалы: разработка, исследование, применение». – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2015. – С. 78.

7. R. Hairullin, A. Kozelskaya, A. Panin, M. Kazachenok. Ultrasonic impact treatment of fine- and coarse grain commercial purity titanium // Abstracts book of International Conference «Sustainable Materials Science and Technology», Paris, July 15-17, 2015. – Badajoz: University of Extremadura, 2015. – P. 147.

8. Хайруллин Р. Р., Панин А.В., Козельская А. И., Казаченок М. С., Синякова Е. А., Почивалов Ю. И. Деформационное поведение технически чистого титана, подвергнутого ультразвуковой обработке и последующему растяжению // Сборник материалов VI Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов», Москва, 10-13 ноября 2015г. – М: ИМЕТ РАН, 2015. – С. 114-115.

9. Хайруллин Р. Р. Роль исходной структуры технически чистого титана в его упрочнении при ультразвуковой обработке // сборник материалов междисциплинарного молодежного научного форума «Новые материалы. Дни науки. Санкт-Петербург 2015», Санкт-Петербург, 20-22 октября 2015 г. – с.65-68.

10. Rustam Hairullin, Anna Kozelskaya, Marina Kazachenok. Effect of Ultrasonic Impact Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Commercial Purity Titanium // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol.685 – p.330-333.

11. Хайруллин Р. Р. Влияние исходного структурного состояния технического титана ВТ1-0 на изменение микроструктуры и микротвердости его поверхностного слоя в процессе ультразвуковой обработки // Инженерия для освоения космоса: сборник научных трудов IV Всероссийского молодежного Форума с международным участием / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – с 109-112

12. Хайруллин Р. Р., Панин А. В., Козельская А. И., Казаченок М. С. Исследование влияния ультразвуковой обработки на микроструктуру и механические свойства технического титана ВТ1-0 // Материалы Международной конференции «Материалы и технологии новых поколений в

современном материаловедении»/ Томский политехнический университет. –
Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – в печати