

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения
(наименование института полностью)
Кафедра «Нанотехнологии, материаловедение и механика»
(наименование кафедры)
22.03.01Материаловедение и технологии материалов
(код и наименование направления подготовки)
Материаловедение и технологии наноматериалов и наносистем
(наименование профиля)

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему «Кинетика и механизм усталостного разрушения
наноструктурированного титанового сплава ВТ6»

Студент	<u>И.С. Луканчев</u> (И.О. Фамилия)	<u>(личная подпись)</u>
Руководитель	<u>Н.А. Клевцова</u> (И.О. Фамилия)	<u>(личная подпись)</u>
Консультанты	<u>Л.Н. Горина</u> (И.О. Фамилия)	<u>(личная подпись)</u>
	<u>Н.В. Яценко</u> (И.О. Фамилия)	<u>(личная подпись)</u>
	<u>В.Г. Виткалов</u> (И.О. Фамилия)	<u>(личная подпись)</u>

Допустить к защите

И. о. заведующего кафедрой к.т.н., А.С. Селиванов
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) (личная подпись)
« _____ » _____ 2017 г.

Тольятти 2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Голыяттинский государственный университет»
Институт машиностроения
(наименование института полностью)
Кафедра «Нанотехнологии, материаловедение и механика»
(наименование кафедры)

УТВЕРЖДАЮ
И.о. завкафедрой «НМиМ»
А.С. Селиванов
(подпись) (И.О. Фамилия)
« ___ » _____ 20__ г.

ЗАДАНИЕ
на выполнение бакалаврской работы

Студент Луканчев Илья Сергеевич

1. Тема Кинетика и механизм усталостного разрушения наноструктурированного титанового сплава ВТ6

2. Срок сдачи студентом законченной выпускной квалификационной работы 15.06.2017

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе материалы по преддипломной практике, стандарты предприятия

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов, разделов):

Аннотация

Abstract

Введение

1. *Раздел «Аналитический обзор»*

2. *Раздел «Методика проведения экспериментов»*

3. *Раздел «Результаты исследования»*

4. *Раздел «Безопасность и экологичность технического заключения объекта»*

Список использованной литературы

5. Ориентировочный перечень графического и иллюстративного материала, презентация к бакалаврской работе

6. Консультанты по разделам:

«Безопасность и экологичность»

Л. Н.Горина

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Аннотация на английском языке

Н.В.Яценко

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Нормоконтроль

В. Г.Виткалов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

7. Дата выдачи задания «___» _____ 2017 г.

Руководитель выпускной квалификационной работы

(подпись)

(И.О. Фамилия)

Задание принял к исполнению

(подпись)

(И.О. Фамилия)

АННОТАЦИЯ

Эта дипломная работа посвящена исследованию ультрамелкозернистого титанового сплава ВТ6.

Целью данной работы является определение кинетики и механизма усталостного разрушения наноструктурированного титанового сплава ВТ6 с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой, полученной путем РКУП, в сравнении с исходным крупнозернистым (КЗ) сплавом.

Объектом исследования является титановый сплав с крупнозернистой и ультрамелкозернистой структурой. В данном исследовании были проведены испытания на усталостную трещиностойкость и так же проведен фрактографический анализ изломов. В этой работе исследовался материал с одинаковым химическим составом и различной структурой.

Первый раздел посвящен аналитическому обзору литературных источников по данной теме. В частности, были рассмотрены различные работы по определению механических свойств титановых сплавов с ультрамелкозернистой структурой, а также исследования других сплавов с такой же структурой.

Во втором разделе представлена методика исследования материала. Расписаны методы, инструменты и оборудование для получения нужных результатов.

В третьем разделе рассматриваются результаты исследования. Данные результаты представлены в виде сравнения и показывают преимущества и недостатки одного материала относительно другого. Сделан сравнительный анализ, построены графики зависимости удлинения от напряжения.

ABSTRACT

This thesis studies ultra-fine-grain titanium alloy Ti-6.

The purpose of this work is to determine the kinetics and mechanism of fatigue failure of a nanostructured titanium alloy Ti-6 with ultrafine-grained (UFG) structure obtained by method of ECAP, in comparison with the initial coarse-grained (CG) alloy.

The object of the study is titanium alloy with a coarse-grained and ultrafine-grained structure. In this study fatigue fracture toughness tests were conducted and fractographic analysis of fractures was also carried out. In this work the material with the same chemical composition and different structure was investigated.

The first section is devoted to the analytical review of literary sources on this topic. In particular, various studies were carried out to determine the mechanical properties of titanium alloys with ultrafine-grained textures, as well as studies of other alloys with the same structure.

In the second section, a technique for studying the material is presented. The methods, tools and equipment are described to obtain the desired results.

The third section considers the results of the study. These results are presented in the form of a comparison and show the advantages and disadvantages of one material with respect to the other. A comparative analysis is made, and load extension diagrams are plotted.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР.....	7
1.1 Наноструктурирование материалов путем интенсивной пластической деформации (ИПД).....	7
1.2 Усталостное разрушение металла	9
1.2.1 Механизм усталостного разрушения металла.....	10
1.2.2 Инициирование трещины	13
1.2.3 Распространение трещин.....	16
1.3 Характеристики усталостной долговечности и разрушения ультрамелкозернистого сплава Ti-6Al-4V, обработанного методом РКУП и экструзией.	19
1.4 Усталость ультрамелкозернистого сплава Ti-6Al-4V, обработанного методом РКУП и экструзией.....	21
2 МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ ССЛЕДОВАНИЯ	25
2.1 Исследуемый материал.....	25
2.2 Методика исследования микроструктуры сплава ВТ6	25
2.3 Методика испытания образцов на растяжение	26
2.4 Методика усталостных испытаний образцов	26
2.5 Методика микрофрактографического анализа	27
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	28
3.1 Микроструктура сплава ВТ6.....	28
3.2 Механические свойства сплава с УМЗ и КЗ структурой	28
3.3 Усталостное разрушение титанового сплава ВТ6	29
3.4 Усталостные изломы сплава ВТ6 в исходном КЗ состоянии и после РКУП в УМЗ состоянии	30
3.5 Микрофрактографические исследования усталостных изломов сплава ВТ6 в КЗ и УМЗ состоянии	31
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ	43
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	44

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время все чаще проводятся исследования материалов и ультрамелкозернистой структурой (УМЗ) и субмикроструктурной структурой (СМК). Это связано с тем, что материалы с такими структурами обладают повышенными физическими и механическими свойствами.

Основным методом получения УМЗ и СМК структур является интенсивная пластическая деформация (ИПД), это происходит за счет измельчения исходной структуры. Одним из методов ИПД является равноканальное угловое прессование (РКУП). Данный метод был разработан В. М. Сегалом с сотрудниками.

Несмотря на то что данный метод получения УМЗ и СМК структур был разработан в 1970-х годах, исследования в этом направлении до сих пор актуальны из-за использования материалов с сложной структурой и составом.

Цель работы: Определить кинетику и механизма усталостного разрушения наноструктурированного титанового сплава ВТ6 с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой, полученной по заданным режимам РКУП в сравнении с исходным крупнозернистым (КЗ) состоянием сплава.

Задачи:

1. Определить механические свойства сплава ВТ6 в КЗ и в УМЗ состоянии.
2. Провести усталостные испытания образцов из титана ВТ6 в КЗ и в УМЗ состоянии после РКУП с измерением скорости распространения трещины.
3. Построить кинетические диаграммы усталостного разрушения сплава ВТ6 и вывести уравнение Париса для сплавов в КЗ и УМЗ состоянии.
4. Исследовать микрорельеф поверхности изломов образцов из сплава ВТ6 с помощью растрового электронного микроскопа «ZEISS».

1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ УСТАЛОСТИ

1.1 Наноструктурирование материалов путем интенсивной пластической деформации (ИПД)

Интенсивная пластическая деформация (ИПД) является составной частью процессов металлообразования, которая в основном используется для введения сверхвысокой пластической деформации в массивный металл с целью создания сверхтонких размеров зерен. В целом, улучшение твердости и предела текучести можно наблюдать с помощью ИПД, а также сверхпластичное поведение этих материалов при более низких температурах и при более высоких скоростях деформации.

Более меньший размер зерна увеличивает прочность и вязкость разрушения материала и создает потенциал для сверхпластической деформации при умеренных температурах и высоких скоростях деформации. Традиционные термомеханические процессы обычно приводят к размеру зерна выше 10 мкм или, в исключительных случаях, в несколько микрон в диаметре. Однако теперь доступны несколько способов получения субмикронных или наноразмерных зерен, например, парового осаждения, высокоэнергетического шарового помола, быстрого затвердевания и интенсивной пластической деформации (ИПД).

Процессы с интенсивной пластической деформацией (ИПД) могут быть определены как процессы формирования металлов, в которых сверхмалая пластическая деформация вводится в массивный металл для создания ультратонкозернистых металлов. В обычных процессах металлического формования, таких как прокатка,ковка и экструзия, налагаемая пластическая

деформация обычно небольшая. Когда многопроходная прокатка, вытяжка и экструзия выполняются с большой пластической деформацией толщина и диаметр становятся очень тонкими и не подходят для использования в конструкционных деталях. Для того, чтобы нагнетать чрезвычайно большую нагрузку на массивный металл без изменения формы, были разработаны многие процессы ИПД.

Как уже упоминалось выше, интенсивная пластическая деформация (ИПД) является одним из методов получения очень тонкой кристаллической структуры в различных объемных металлах и сплавах, которые обладают различными кристаллографическими структурами. ИПД вызывает образование микрозернистых и субмикрометровых субзерен в первоначально грубозернистых материалах, и в результате наблюдается улучшение механических характеристик. Механизм, ответственный за этот эффект, все еще находится в стадии изучения, однако, считается, что короткие и дальние пересекающиеся полосы сдвига, вызванные пластической деформацией, играют важную роль при разделении зерна, и местное динамическое восстановление и процессы перекристаллизации способствуют очистке зерен[1].

Угловое прессование с равным каналом (РКУП) является одним из наиболее используемых методов интенсивной пластической деформации (ИПД); Он может быть применен к различным металлам и сплавам для получения ультрадисперсных зерен и хороших механических и физических свойств.

Принцип РКУП схематически изображен на рисунке 1.1. Для матрицы, показанной на рисунке 1, внутренний канал изогнут под резким углом Φ , и есть дополнительный угол Ψ , который представляет внешнюю дугу кривизны, где каналы пересекаются. Образец, выполненный в виде стержня, подвергается механической обработке, чтобы он поместился внутри канала, и матрица была помещена в некоторую форму, так что образец можно было проталкивать через матрицу с помощью пуасона.

Характер наложенной деформации – это простой сдвиг, который происходит, когда заготовка проходит через штамп. Сохранение одной и той же площади поперечного сечения при обработке с помощью РКУП, несмотря на введение очень больших напряжений, является важной характеристикой обработки ИПД, и именно эта характеристика отличает этот тип обработки от обычных металлообрабатывающих операций, таких как прокат, экструзия и волочение. Поскольку площадь поперечного сечения остается неизменной, одна и та же заготовка, может прогоняться повторно для достижения исключительно высокой деформации[2].

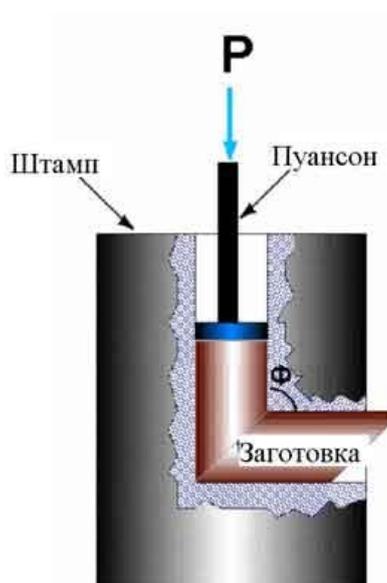


Рисунок 1.1 – Интенсивная пластическая деформация путем равноканального углового прессования (РКУП)

1.2 Усталостное разрушение металла

В науке о материалах усталость - это ослабление материала, вызванное многократными приложениями нагрузок. Это прогрессирующий и локализованный структурный ущерб, который возникает, когда материал подвергается циклической нагрузке. Номинальные максимальные значения напряжений, которые вызывают такое повреждение, могут быть намного

меньше прочности материала, обычно указанного в качестве предельного предела прочности при растяжении, или предела текучести.

Усталость возникает, когда материал подвергается многократной нагрузке и разгрузке. Если нагрузки превысят определенный порог, микроскопические трещины начнут формироваться на концентраторах напряжений, таких как поверхность, стойкие полосы скольжения и границы раздела зерен. В конце концов трещина достигнет критического размера, трещина начнет разрастаться. Форма конструкции будет значительно влиять на усталостную долговечность; Квадратные отверстия или острые углы приведут к повышенным локальным напряжениям, где могут начинаться усталостные трещины. Таким образом, круглые отверстия и гладкие переходы или филе повышают усталостную прочность конструкции[3].

1.2.1 Механизм усталостного разрушения металла

Большинство отказов инженерных компонентов - результат накопления повреждений при циклическом нагружении, при нагрузках, значительно ниже предела прочности материала, используемого для этого компонента. Для этих типов отказов используется термин усталость. Усталость первоначально использовалась для описания того, что материал устал во время прикладной циклической нагрузки и потерянных частей его первичной прочности. Благодаря экспериментальной работе, тщательной микроскопии и математическому моделированию улучшилось понимание усталостных явлений, поскольку усталость металла была впервые описана для стальных проволок в 1838 году. Однако удивительно, что многие вопросы не совсем понятны, и прогнозы жизни умеренно сложных компонентов обычно не лучше, очень часто намного хуже. Это подразумевает необходимость дальнейшей работы, чтобы избежать дорогостоящих отказов и нежелательного консерватизма при проектировании компонентов, подвергнутых циклической нагрузке[4].

Усталостное разрушение вызвано циклической нагрузкой при нагрузках, значительно ниже предельной прочности материалов. Для того, чтобы вызвать усталостное повреждение, материал должен подвергаться постоянному изменению вследствие циклической нагрузки. Если приложенная нагрузка выше, чем измеренный глобальный упругий режим, то легко заметить, что свойства материала изменились. Постоянная деформация может быть измерена, и напряжение и деформация никогда не могут снова достичь нуля в одно и то же время. Этот тип усталости называют низкой усталостью цикла или НУЦ. В большинстве металлических материалов режим НУЦ в течение жизни колеблется от нескольких циклов и до 10^4 - 10^5 циклов. Если амплитуды приложенной нагрузки находятся в упругом режиме, очень трудно наблюдать какие-либо изменения в материале на глобальном уровне, и нет изменений в поведении напряжения-деформации. Однако на местном уровне небольшие объемы были подвергнуты нагрузкам, превышающим упругий режим, которые вызвали постоянный местный ущерб материалу. Этот тип усталости называют высокой усталостью цикла или ВУЦ. В большинстве металлических материалов в жизни колеблется от 10^5 и выше. Как для нагрузок типа НУЦ, так и для ВУЦ процесс усталости можно разделить на инициирование трещины и распространение трещины. Количество инициирования трещины зависит от определения трещины, а также, если материал не содержит дефектов или содержит большие дефекты[5].

При нагружении детали напряженность различных зерен будет различной, так как вследствие анизотропии свойств кристаллов и случайной ориентировки их кристаллографических осей жесткость каждого кристалла в направлении действия нагрузки будет отличаться от жесткости соседних кристаллов.

Вследствие указанной неоднородности при переменных напряжениях, даже не превышающих среднего значения предела пропорциональности, в

отдельных неблагоприятно ориентированных зернах начинается циклическая пластическая деформация.

Образование первых следов сдвига начинается, как правило, на поверхности детали вследствие облегченных условий деформирования зерен в этой зоне, наличия концентрации напряжений от микронеровностей на поверхности. Кроме этого на поверхности детали обычно действуют наибольшие нормальные и касательные напряжения.

Поверхность усталостного излома детали имеет две совершенно различные зоны (рис. 1.2). Одна из них - зона распространения трещины (А) в результате взаимного трения и наклепа от повторяющегося нажатия поверхностей трещины друг на друга имеет гладкую, притертую поверхность. Другая зона (Б) даже в случае пластичного материала имеет крупнозернистую структуру, такую же, как и поверхность разрушения образца из чугуна, при одноосном статическом растяжении.

Именно поэтому, вначале разрушение при переменных напряжениях приписывали «перерождению» или «кристаллизации» (усталости) материала, делающей его хрупким. Дальнейшие исследования показали, что механические свойства и микроструктура материала около места усталостного разрушения такие же, как и до нагружения детали.

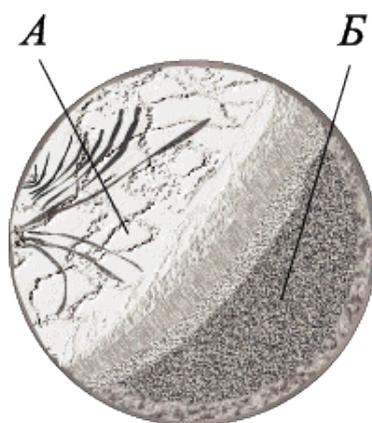


Рисунок 1.2- Зоны излома

С хрупким характером разрушения пластичного материала в зоне шейки мы уже встречались при испытании образцов на одноосное

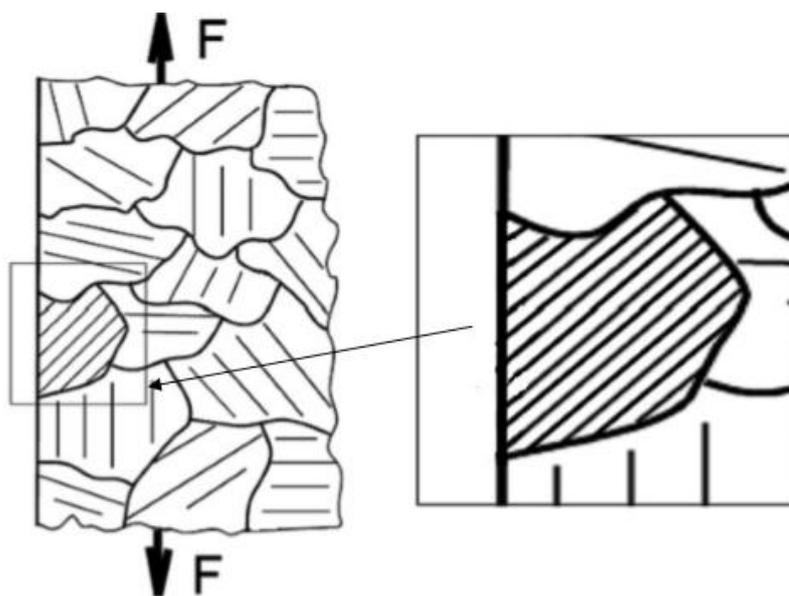
растяжение в условиях статического нагружения. Хрупкий характер разрушения, по виду очень похожий на усталостный, в крупнозернистой зоне, получается при статическом изгибе образца из пластичного материала с острым надрезом. В вершине надреза возникает объемное напряженное состояние, и поэтому развитие пластических деформаций здесь затруднено. Роль такого надреза при переменных напряжениях выполняет первоначальная трещина. Таким образом, по-видимому, одной из главных причин хрупкого характера разрушения в зоне (Б) является трехосное напряженное состояние материала, возникающее на границе трещины.

Усталостное разрушение происходит, как правило, без заметной пластической деформации детали.

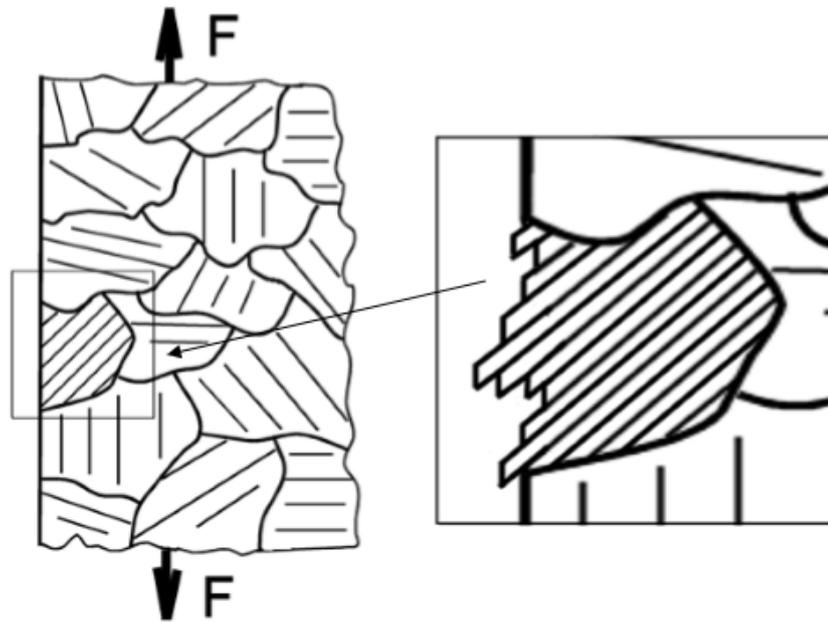
1.2.2 Инициирование трещины

Идеальный материал не содержит никаких дефектов, таких как пористость, включения или другие дефекты. Однако даже совершенный материал имеет микроструктуру с характерными размерами, которая на практике будет действовать как дефект. Конечно, никакой материал не совершенен, но характерные размеры в микроструктуре во многих случаях являются более слабым звеном, чем присущие им недостатки материала. В этом случае инициирование трещины может начинаться с зернышка с неблагоприятным направлением относительно направления нагрузки. Каждое зерно представляет собой монокристалл, который может иметь совершенно разные свойства в разных направлениях. Для того, чтобы инициировать трещину, требуется пластичность (даже если только локально), и это происходит в случае инициации трещины с преобладанием зерна, вызванной перемещением дислокаций в системах скольжения, где требуемое напряжение сдвига минимально. Пластическая деформация сдвигом легче на свободной поверхности, чем в середине материала из-за ограничений окружающих зерен. Следовательно, инициирование трещины почти всегда

инициируется в одном из больших зерен на поверхности, имеющем предпочтительную систему скольжения, в том же направлении, что и максимальное направление сдвига усталостной нагрузки, то есть наклон 45° к направлению нагрузки. Причина, по которой инициация трещины преимущественно происходит в больших зернах, заключается в том, что расстояние скольжения ограничивается размером зерна в направлении скольжения. Проскальзывание зерна по одной системе скольжения в конечном итоге приведет к появлению ряда устойчивых полос скольжения (см. Рисунки 1.3 и 1.4). Эти устойчивые полосы скольжения будут перемещаться вперед и назад и, наконец, инициировать трещину. Постоянные полосы скольжения трудно наблюдать, кроме монокристаллов, где им позволено перемещаться на очень большие расстояния (см. Рис. 4)[6].



a)



б)

а - при усталостной нагрузке первых циклов, б - вблизи зарождения трещины

Рисунок 1.3- Схема, показывающая создание устойчивых полос скольжения



Рисунок 1.4- Устойчивые полосы скольжения и зародышевая трещина в Cu-кристалле

Некоторые исследователи утверждают, что нет такой вещи, как инициация трещины. Однако существование инициирования трещин в основном связано с определением трещины. Если минимальный размер трещины имеет размер трещины в мм, существует и может простираться на несколько тысяч циклов усталости. Однако, если трещина определена в атомном масштабе, термин инициация трещины является сомнительным, так как инициирование трещины произойдет во время первого цикла усталости или циклов[7].

Одним возможным определением конца части инициации трещины может быть, когда трещина изменяет поведение от трещины сдвига до трещины, растущей перпендикулярно направлению основного напряжения (см. Рисунок 1.5).

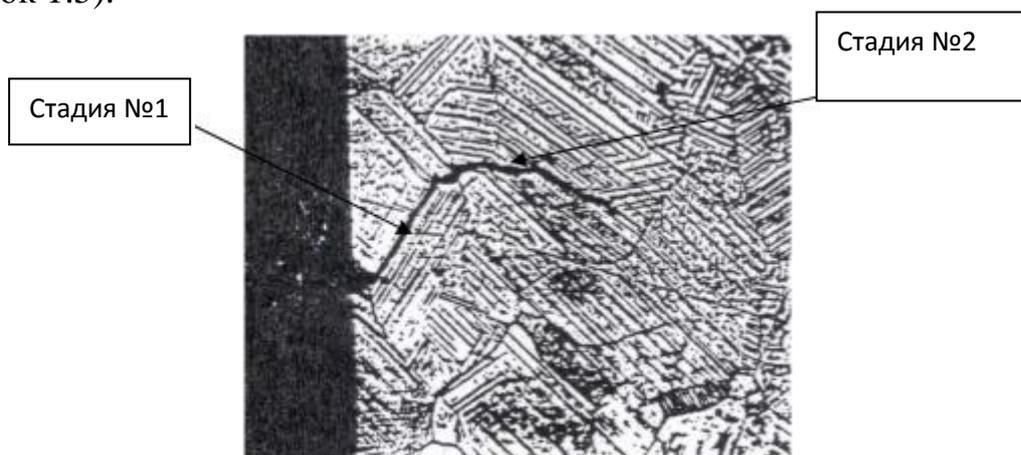


Рисунок 1.5- Переход трещины со стадии 1 на стадию 2

Инициирование трещины не всегда существует. Когда врожденные дефекты материала или поверхности материала приводят к окончательному разрушению, а не характерному размеру в микроструктуре, часть усталости, иницирующей трещину, может быть проигнорирована, а в усталостной долговечности преобладает только рост усталостной трещины.

1.2.3 Распространение трещин

С определением инициирования трещин, сделанным выше, усталостной долговечности начинается, когда трещина начинает расти перпендикулярно направлению основного напряжения. В этом случае рост трещины можно в основном описать как рост трещины по модулю 1. В зависимости от размера трещины при переходе со стадии 1 на стадию 2 трещина может проявлять малый рост трещин или нет. Рост трещины для коротких трещин намного быстрее, чем ожидалось от предсказания линейной упругой трещины с данными для длинных трещин. Более того, растрескивание на стадии 1, вероятно, является причиной короткого поведения роста трещин. Маловероятно, что трещины, развивающиеся при дефекте внутри материала, будут демонстрировать выраженное короткое поведение роста трещин, но если они это сделают, это, скорее всего, связано с отсутствием закрытия трещины[8].

1.2.4 Кинетическая диаграмма усталостного разрушения

Сейчас для анализа процесса в стадии распространения трещины усталостного разрушения принято представлять экспериментальные данные в виде кинетической диаграммы, которая отображает зависимость скорости распространения трещины от размаха. Кинетическая диаграмма представляет из себя S-образную кривую, которая ограничивается коэффициентом интенсивности напряжения, ниже которого трещина распространяется с крайне медленной скоростью или совсем не распространяется.[9].

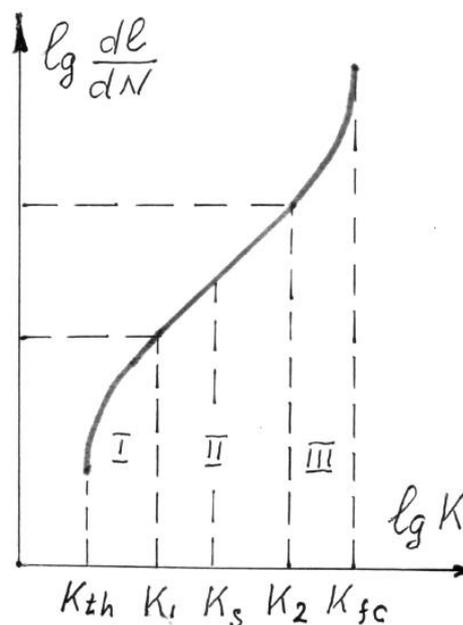


Рисунок 1.7– Кинетическая диаграмма усталостного разрушения

Как говорит автор [1] «Кинетическая диаграмма усталостного разрушения состоит из трех участков (см. рис. 1.7), которым соответствуют различные доминирующие механизмы разрушения. На первом участке скорость распространения трещины контролируется механизмом сдвига, на втором – механизмом микроотрыва, на третьем – смешанным механизмом (микросдвиг и микроотрыв). Переход от одного участка кинетической диаграммы разрушения к другому происходит при достижении пороговых значений коэффициента интенсивности напряжения (K_I – при переходе от первого ко второму участку и K_2 – при переходе от второго к третьему участку). Кроме вышеперечисленных пороговых значений коэффициента интенсивности напряжения, выделяют также пороговое значение K_S (см.рис.1.7), соответствующее критической длине усталостной зоны!»[1].

На низкоамплитудном участке усталостной диаграммы присутствует повышенная чувствительность процесса разрушения к микроструктуре металла. Это обусловлено размерами пластических зон, которые соизмеримы размерами зерен в материале.

В частности, имеются данные, что переход от первого ко второму участку кинетической диаграммы соответствует условию, когда размер

циклической зоны у вершины трещины достигает размера зерна в металле.[10]

Второй, средне амплитудный участок включает область скоростей трещины примерно от 10^{-8} м/цикл до 10^{-6} м/цикл. Зависимость скорости роста трещины от ΔK или K_{\max} в этой области определяется известным уравнением Пэриса: $dl/dN = C \cdot \Delta K(K_{\max})^n$, где C и n – константы. В тоже время степень n в формуле определяется свойствами данного материала и он меняет свое значение от 1,4 до 12, а коэффициент C уже зависит от условий испытаний, частоты нагружения, асимметрии цикла и температуры [11].

На третьем, высокоамплитудном участке наблюдается резкое повышение скорости распространения усталостной трещины. В этой области коэффициент интенсивности напряжения приближается к критическому своему значению.[12]

Одним из наиболее важных факторов проведения испытания на усталостную трещиностойкость является температура испытания. Температура оказывает влияние не только на механические свойства материала, но и на активность взаимодействия со средой. Как правило, при снижении температуры скорость распространения трещины возрастает.[13,14]

1.3 Характеристики усталостной долговечности и разрушения ультрамелкозернистого сплава Ti-6Al-4V, обработанного методом РКУП и экструзией.

Были проведены эксперименты по изучению низко циклового деформационного поведения сверх тонкозернистого сплава Ti-6Al-4V, полученного с помощью интенсивной пластической деформации (ИПД) посредством сочетания равноканального углового прессования (РКУП) и экструзии. Усталостные свойства были исследованы с помощью

усталостных испытаний с контролируемым напряжением при амплитудах напряжений в диапазоне 700-1050 МПа.

Результаты этого исследования показывают, что формирование структуры УМЗ в сплаве Ti-6Al-4V практически не влияет на внешний вид поверхностей разрушения. Наиболее значительные отличия в структурах трещин наблюдались после испытания при амплитуде напряжения 900 МПа, где площадь зоны усталости в образце КЗ была наименьшей. Ямкнутая структура при разрыве, которая наблюдалась в зонах ускоренного разрушения и конечной перегрузки, характерна для пластического разрушения Ti-сплавов. Повышенный усталостный предел выносливости наблюдался в образце с УМЗ-структурой по сравнению с КЗ-структурой при одинаковом числе циклов, и это легко объясняется большей граничной поверхностью мелких зерен. Однако, уточнение зерна также увеличивает количество мест, доступных для инициации микротрещин, и это подтверждается меньшим размером клеток разрыва на поверхности разрыва образцов УМЗ по сравнению с образцами КЗ. Похоже, что из-за этой разницы критическая нагрузка в сплаве УМЗ Ti-6Al-4V достигается быстрее, чем в условиях КЗ, и эта разница характеризуется более высоким наклоном кривой, как показано на рисунке 1.8 [15].

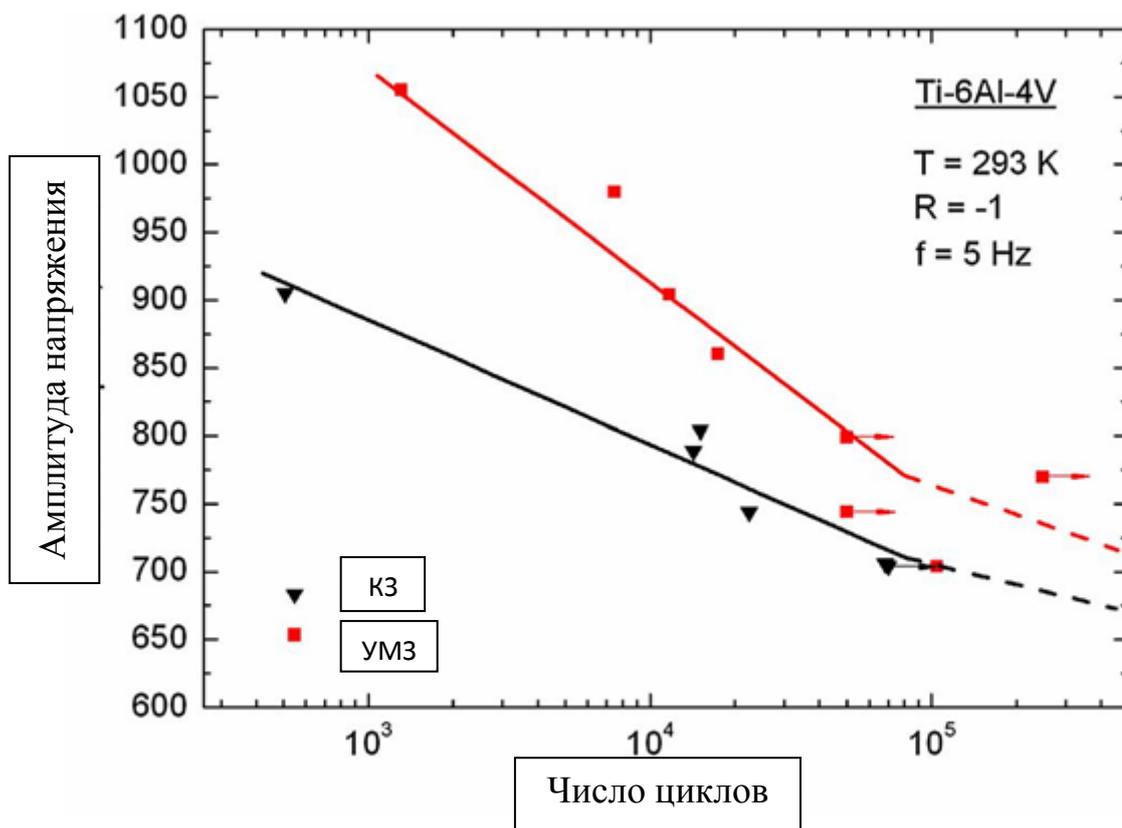


Рисунок 1.8 - Схема малоциклового усталости для Ti-6Al-4V с структурами зерен УМЗ и КЗ

1.4 Усталость ультрамелкозернистого сплава Ti-6Al-4V, обработанного методом РКУП и экструзией

Эта работа сфокусирована на исследовании высокоциклового усталостного поведения сплава Ti-6Al-4V, подвергнутого сочетанию равноканального углового прессования и экструзии. Образцы с бимодальной микроструктурой и структурой ультрамелкозернистого (УМЗ) испытывают с использованием циклического вращательного изгиба. Рассмотрены основные отличия поверхностей разрушения УМЗ и бимодального сплава Ti-6Al-4V. Также обсуждается влияние структуры УМЗ на сопротивление сплава иницированию и распространению усталостной трещины.

Хорошо известно, что микроструктура оказывает сильное влияние на высокоцикловую усталость (ВЦУ) двухфазных Ti-сплавов. Как было выяснено, сплав Ti-6Al-4V проявляет наилучшую стойкость к усталостному

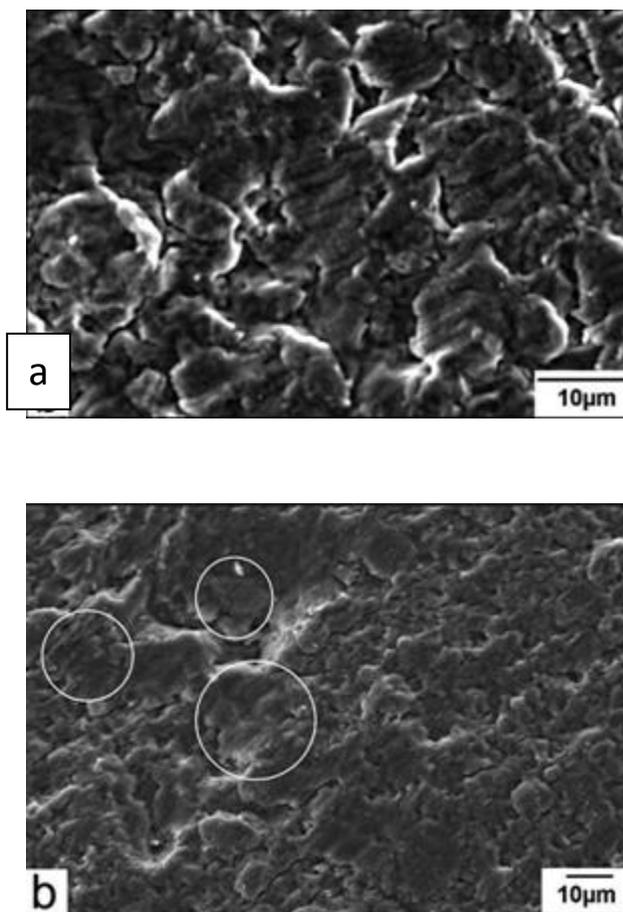
циклу с большим циклом (10^7 циклов) в случае образования смешанной глобулярной и тонкой пластинчатой микроструктуры, в отличие от случая равноосных и слоистых структур. Микроструктуры такого типа часто называют бимодальными или дуплексными. В настоящей работе было продемонстрировано, что наибольший прирост предела выносливости сплава Ti-6Al-4V был достигнут за счет образования структуры УМЗ с средним размером зерна / субзерна 250 нм. Разница в значениях усталостной прочности составляла около 40% (610 и 690 МПа для бимодальных и УМЗ структур соответственно). Отношение s_1/UTS для сплава Ti-6Al-4V с бимодальными и УМЗ структурами составляет 0,58 и 0,47, соответственно (таблица 2)[16].

Таблица 1.1 -Механические свойства сплавов титана в различных состояниях.

Сплав	Среднее значение UTS [МПа]	S_1 [МПа]	S_1/UTS
Ti-6Al-4V (это исследование)			
КЗ бимодальный	1050	610	0.58
УМЗ	1450	690	0.47
Ti-6Al-4V ELI			
КЗ равноосный	1000	600	0.54
УМЗ	1380	740	0.47

Такое поведение наблюдается также в других материалах Ti, подвергнутых воздействию ИПД, как указано в таблице 2, когда увеличение прочности на растяжение из-за формирования структуры УМЗ выше, чем увеличение предела усталости. Возможно, это объясняется более высокой восприимчивостью материалов УМЗ к локализации пластического течения, вызванным их низкой эффективностью хранения дислокаций из-за их малых зерен и очень высокой плотностью дислокаций. Отношение

s_1/UTS для сплавов Ti преимущественно находится на границах зерен, и поэтому на границах зерен наиболее вероятно появление и развитие усталостных трещин в межкристаллитном режиме. Об этом свидетельствует более плавный рельеф образца УМЗ в зоне устойчивого роста трещины (I) по сравнению с образцом КЗ (рис. 1.9а и 1.9б).



а- КЗ Ti-6Al-4V, б- УМЗ Ti-6Al-4V

Рисунок 1.9- Изображения поверхности усталостного разрушения образца вращающегося изгиба

Возможно, что большая длина границы зерна в сплаве УМЗ увеличивает путь трещины, а также способствует увеличению усталостной долговечности при тех же условиях испытания.

Эти результаты показывают, что высокая прочность на усталость может быть успешно получена в сплаве Ti-6Al-4V через РКУП и

дополнительной экструзии и термообработке. Образование структуры УМЗс₀ средним размером зерен α - и β -фазы 250 нм приводит к увеличению предела усталостной выносливости при вращательном изгибе до 690 Мпа, где это превышает предел усталостной выносливости сплава с Бимодальную микроструктуру (610 Мпа после 10^7 циклов), полученную в соответствии со стандартной термообработкой.

Установлено, что отношение предела усталостной выносливости к пределу прочности сплава УМЗ Ti-6Al-4V составляет 0,47, что, как и для большинства промышленных Ti-сплавов, находится в пределах 0,4-0,6 (вероятность 90%), И является важным условием для использования в инженерных приложениях.

Анализ поверхности трещин образцов после испытаний на усталость в условиях высокого цикла показывает, что образование структуры УМЗ в сплаве не изменяет рельефа трещины. Однако зона зоны усталости в образце УГФ приблизительно на 20% больше по сравнению с зоной усталости в образце КЗ, и это может быть связано с увеличением пути распространения трещины из-за более высокой плотности зерен и границ субзерен.

2 МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ ССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Исследуемый материал

В качестве исследуемого материала в настоящей работе использовали титановый сплав ВТ6. Химический состав сплава показан в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Химический состав сплава ВТ6

Спла в	Содержание элемента в % по массе		
	V	Al	Ti
ВТ6	5,95	5,01	85,05

Данный материал исследовали в исходном КЗ состоянии и после РКУП¹⁾ в УМЗ состоянии. Температура полиморфного превращения ($T_{\text{ПП}}$) в сплаве составляет $(975 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Исходное состояние сплава получено путем горячей прокатки заготовок (Производство ПАО «Ависма», Верхняя Салда).

Технология проведения РКУП сплава заключалась в следующем¹⁾. Заготовку из сплава диаметром 20 мм и длиной 100 мм подвергали гомогенизационному отжигу с целью повышения пластичности. Затем проводили закалку в воду с температуры $960 ^\circ\text{C}$ (выдержка 1 час), отпуск при $675 ^\circ\text{C}$ в течение 4 часов, РКУП при $650 ^\circ\text{C}$ (маршрут Вс, $\varphi = 120^\circ$, $n = 6$ проходов)

2.2 Методика исследования микроструктуры сплава ВТ6

Структуру сплава изучали на оптическом микроскопе, а также в растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEOLJSM-6390. Тонкую структуру сплава после РКУП изучали в просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) JEOLJEM2100 при ускоряющем напряжении 200 кВ^1 .

2.3 Методика испытания образцов на растяжение

Статическое растяжение круглых образцов диаметром 5 мм проводили на универсальной испытательной машине Н50КТ. Скорость растяжения составляла 5 мм/мин.

2.4 Методика усталостных испытаний образцов

Усталостные испытания призматических образцов толщиной 10 мм проводили при температуре 20 °С по схеме трехточечного изгиба на установке Instron 8802 (рис.2.1) при $\nu=10$ Гц, $R=0,1$ и ΔP от 2000 до 4500 Н.



Рисунок 2.1 – Система Instron 8802 для усталостных испытаний

-
- 1) РКУП сплава и исследование микроструктуры сплава было проведено сотрудниками Института физики перспективных материалов УГАТ

2.5 Методика микрофрактографического анализа

Микростроение изломов исследовали в растровом электронном микроскопе SIGMA фирмы «ZEISS» (рис. 2.2).

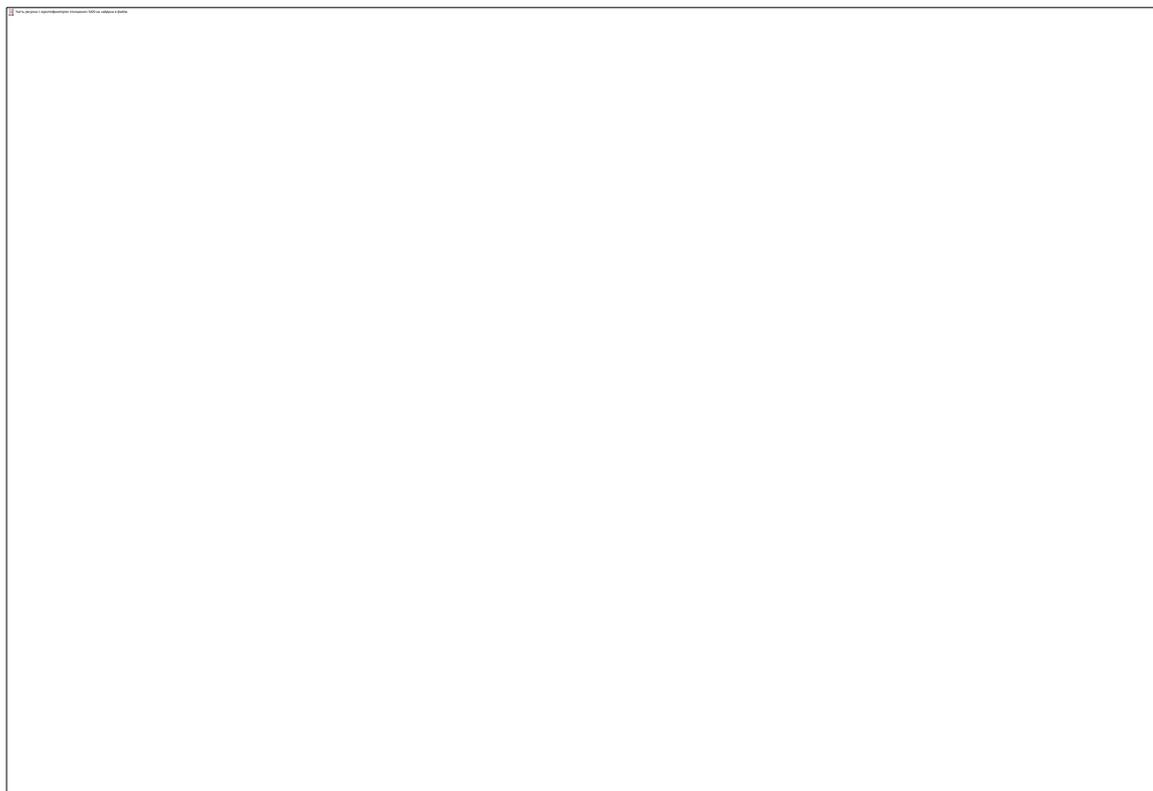
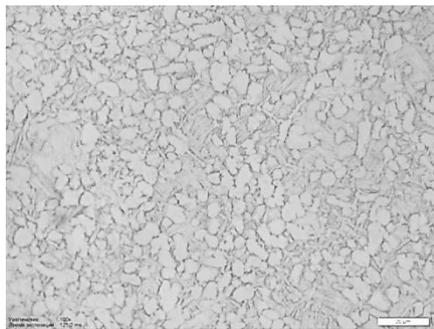


Рисунок 2.2 – Растровый электронный микроскоп SIGMA фирмы «ZEISS»

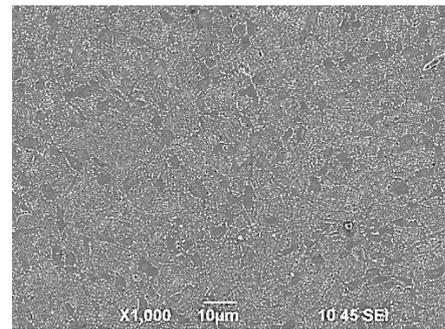
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Микроструктура сплава ВТ6

На рисунке 3.1а приведена микроструктура сплава ВТ6 в исходном состоянии. Структура исходной заготовки представляет собой типичную для горячекатаных прутков смешанную глобулярно-пластинчатую структуру: первичная α -фаза в виде равноосных зерен с размером (15 ± 5) мкм и области с пластинчатой ($\alpha+\beta$) структурой. Объемная доля глобулярной составляющей α -фазы была около 65%. Термическая обработка и РКУП сплава привели к уменьшению размера первичных зерен α -фазы до 5 мкм (рис. 1 б). Доля УМЗ структуры со средним размером зерен/субзерен α -фазы (240 ± 60) нм составляла около 70 % (рис. 3.1 в).



а)



б)

а- в состоянии поставки (оптическая микроскопия), б- после РКУП

РЭМ

Рисунок 3.1 – Микроструктура сплава ВТ6

3.2 Механические свойства сплава с УМЗ и КЗ структурой

Из таблицы 3.1 видно, что РКУП по вышеуказанным режимам повышает твердость и прочностные свойства сплава ВТ6, примерно, в 1,2 раза, однако снижает пластичность в 1,4 раза.

Таблица 3.1 – Средний размер зерна и механические свойства титанового сплава ВТ6

Состояние стали	$d_{cp.}$, мкм	HRC	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Исходное состояние	15±5	34	950±20	849±30	11,5±1,5
После РКУП	0,24±0,06	36	1090±30	990±40	8,3±0,3

3.3 Усталостное разрушение титанового сплава ВТ6

Из таблицы 4 видно, что при одних и тех же условиях нагружения (ΔP) долговечность образцов (количество циклов до разрушения) из сплава в исходном состоянии выше, чем после РКУП. С уменьшением напряжения цикла, количество циклов до зарождения усталостной трещины уменьшается. Однако состояние сплава на данную характеристику оказывает незначительное влияние.

Таблица 3.2 – Общая долговечность образцов до разрушения ($N_{общ}$) и относительное количество циклов до зарождения усталостной трещины ($N_{зар.}$) в образцах из сплава ВТ6 в исходном состоянии и после РКУП

ΔP , н		2000	2500	3500	4500
$N_{общ.}$, цикл	Исходное	-	$1,18 \cdot 10^5$	$3,13 \cdot 10^4$	$1,59 \cdot 10^4$
	После РКУП	$1,07 \cdot 10^5$	$5,76 \cdot 10^4$	$1,88 \cdot 10^4$	-
$N_{зар.}$, %	Исходное	-	21	26	27
	После РКУП	21	23	27	-

Прямолинейный участок на кинетических диаграммах усталостного разрушения сплава ВТ6, изображенных на рисунке 3.2, аппроксимируется уравнением Пэриса:

для КЗ сплава:

$$\frac{dl}{dN} = 7,6 \cdot 10^{-12} \Delta K^{3,63},$$

для УМЗ сплава:

$$\frac{dl}{dN} = 2,5 \cdot 10^{-11} \Delta K^{3,30}$$

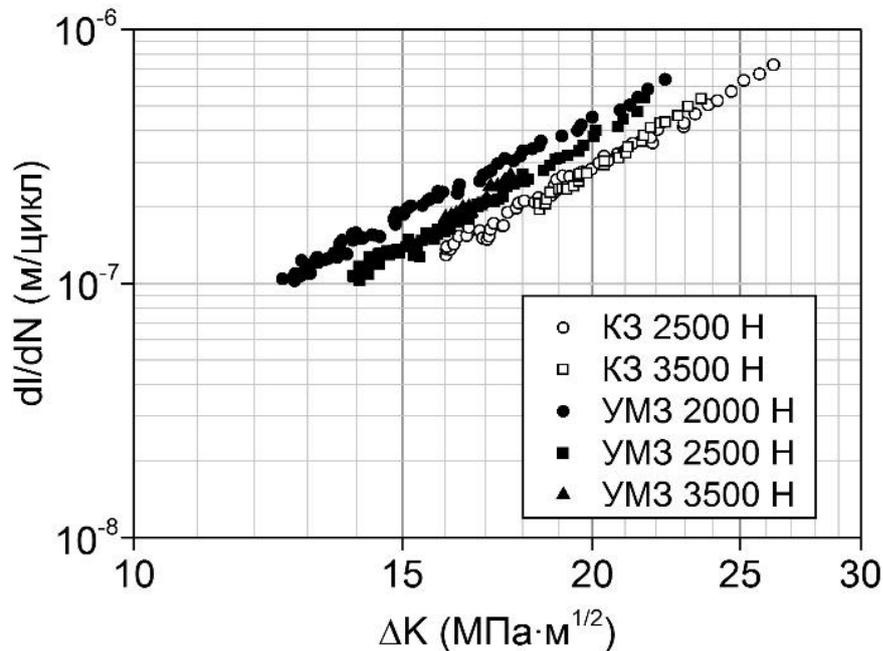


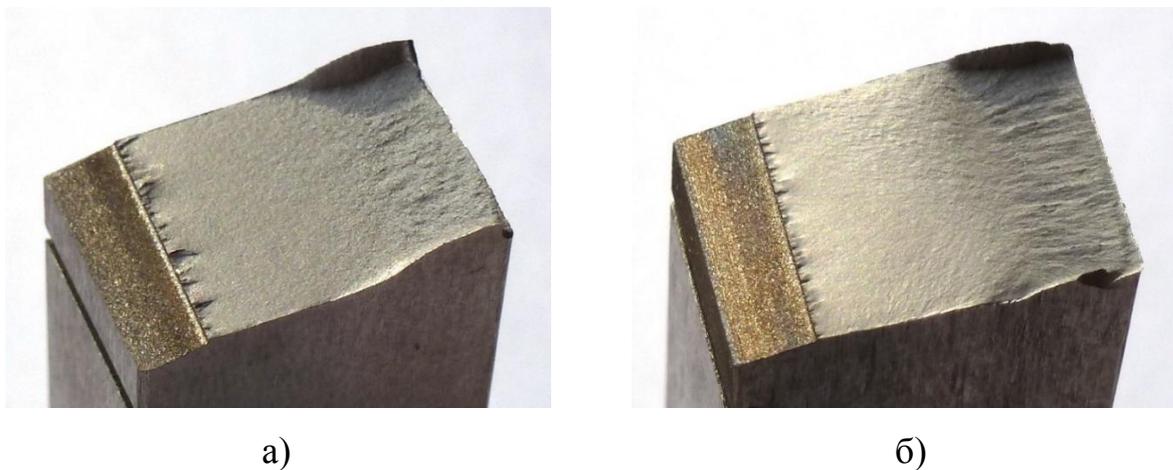
Рисунок 3.2 – Прямолинейный участок кинетических диаграмм усталостного разрушения

Из рисунка 3.2 видно, что при одном и том же значении ΔK скорость распространения усталостной трещины в сплаве с УМЗ структурой несколько выше, чем в исходном сплаве. Однако коэффициент n в уравнении Пэриса для сплава с УМЗ структурой несколько ниже, чем с сплава с КЗ структурой. Следовательно, сплав УМЗ структурой менее чувствителен к перегрузкам.

3.4 Усталостные изломы сплава ВТ6 в исходном КЗ состоянии и после РКУП в УМЗ состоянии

На всех полученных изломах видны две зоны: зона усталостного развития трещины (зона l_f) и зона долома (рис. 3.3). Длина зоны l_f представлена в таблице 5. Видно, что на изломах, полученных при одном и

том же значении ΔP , длина зоны l_f больше в случае сплава в исходном состоянии, чем после РКУП.



а- в исходном КЗ состоянии $\Delta P = 2500H$, б- после РКУП в УМЗ состоянии $\Delta P = 2000H$

Рисунок 3.3 – Общий вид усталостных изломов сплава ВТ6

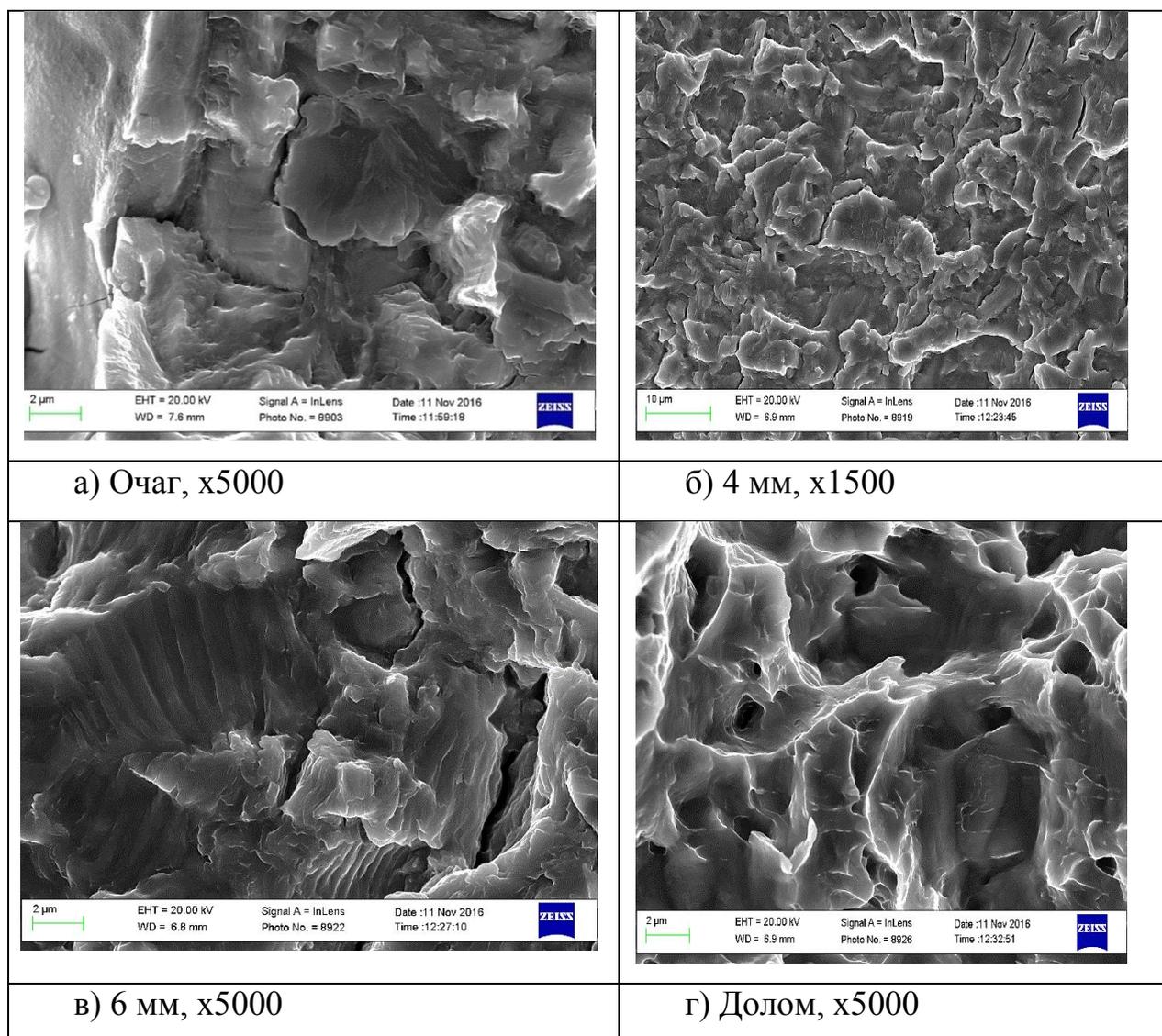
Таблица 3.3 – Длина усталостной зоны l_f на поверхности изломов образцов из сплава ВТ6 в исходном состоянии и после РКУП

ΔP , н		2000	2500	3500	4500
l_f , мм	Исходное	-	8,6	6,6	5,5
	После РКУП	8,1	7,1	4,8	-

3.5 Микрофрактографические исследования усталостных изломов сплава ВТ6 в КЗ и УМЗ состоянии

Микрофрактографические исследования усталостных изломов сплава ВТ6 в КЗ состоянии показали, что в очаге разрушения зона вытяжки θ отсутствует (рис.3.4а). Микрорельеф в очаге разрушения можно характеризовать как «чешуйчатый»; видны фасетки циклического скола. Такой же «чешуйчатый» микрорельеф сохраняется на всем протяжении

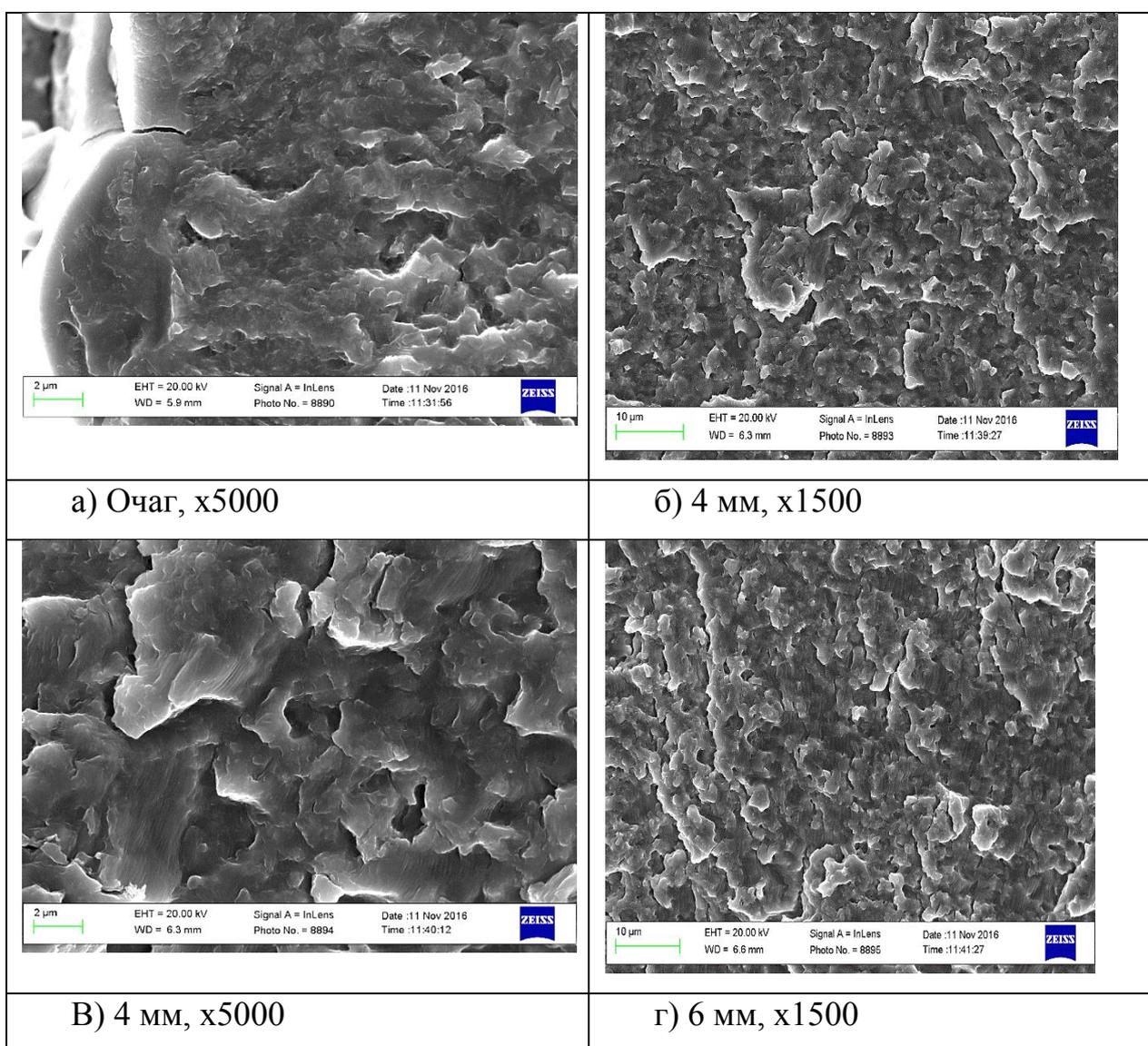
усталостного развития трещины (рис.3.4б, в). Вблизи зоны долома на поверхности чешуек можно наблюдать усталостные бороздки (рис.3.4 в). Микрорельеф зоны долома состоит из гладких неравномерных ямок (рис.3.4 г).

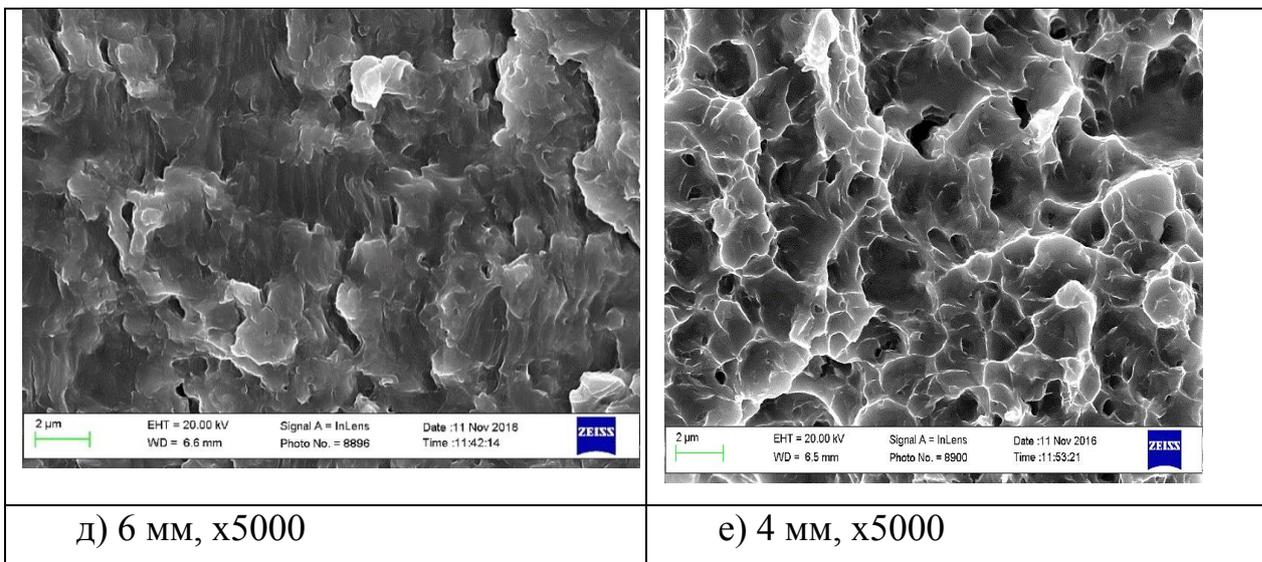


а- в очаге разрушения, б- при длине усталостной трещины $l = 4$ мм, в- $l = 6$ мм, г- также в зоне долома

Рисунок 3.4 – Микрорельеф поверхности усталостного излома сплава ВТ6 в КЗ состоянии ($\Delta P = 2500$ н)

В очаге разрушения усталостных изломов сплава в УМЗ состоянии можно наблюдать мелорельефную область длиной 2-5 мкм. Затем формируется «чешуйчатый» микрорельеф (рис.3.5а). Такой микрорельеф, как и в предыдущем случае, сохраняется на всем протяжении развития усталостной трещины. Однако, если на начальных стадиях развития усталостной трещины чешуйки сравнительно гладкие (рис.3.5б, в), то вблизи зоны долома видны усталостные бороздки (рис.3.5г,д). В зоне долома микрорельеф состоит из мелких глубоких ямок (рис.3.5е).





а- в очаге разрушения, (б,в)- при длине усталостной трещины $l = 4$ мм, (г,д)-
и $l = 6$ мм, г- также в зоне долома

Рисунок 3.5 – Микрорельеф поверхности усталостного излома сплава ВТ6 в
УМЗ состоянии ($\Delta P = 2000$ н)

4 БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

Технический объект выпускной квалификационной работы (технологический процесс, технологическая операция) характеризуется прилагаемым технологическим паспортом (см. табл. 4.1). Наименование должностей и число работников, непосредственно участвующих в процессе производственно-технологической работы и выполнение технологических операций квалифицируется согласно [17].

Таблица 4.1 - Технологический паспорт технического объекта

п / п	Технологический процесс	Технологическая операция, вид выполняемых работ	Наименование должности работника, выполняющего технологический процесс, операцию [17]	Оборудование, техническое устройство, приспособление	Материалы, вещества
1	Испытания титанового сплава ВТ-6 на твердость	Помещение образца на испытательный столик; проведение замера.	Младший научный сотрудник	твердомер ТН 300	Образцы
2	Статическое растяжение титанового сплава ВТ-6	Установка оснастки; установка образца; Проведение испытаний; Снятие образца и оснастки.	Старший научный сотрудник, техник	универсальная испытательная машина TiniusOlsen H50KT	Образцы

Продолжение таблицы 4.1

3	Испытание титанового сплава ВТ-6 на усталость	Установка оснастки; проведение испытаний; снятие образца с оснастки	Старший научный сотрудник, техник	установка Instron 8802	Образцы
---	---	---	-----------------------------------	------------------------	---------

Результаты выполненной идентификации профессиональных рисков приводятся в таблице (см. табл. 4.2). Наименование возникающих опасных и/или вредных производственно-технологических факторов приведены, согласно [18].

Таблица 4.2 – Идентификация профессиональных рисков.

№п/п	Производственно-технологическая и/или эксплуатационно-технологическая операция, вид выполняемых работ	Опасный и /или вредный производственный фактор[18]	Источник опасного и / или вредного производственного фактора
1	Испытания титанового сплава ВТ-6 на твердость	движущиеся машины и механизмы	твердомер ТН 300
2	Испытание титанового сплава ВТ-6 на усталость	движущиеся машины и механизмы	установка Instron 8802

Организационно-технические методы и средства защиты выбираются с учетом действующих на данный момент времени требований нормативных документов согласно [19].Используемые средства индивидуальной защиты для работников, выполняющих конкретные операции производственно-

технологического процесса (при необходимости) приводятся согласно действующим нормативным документам [20].

Результаты проведенных работы отражаются в виде сводной таблицы (см. табл. 4.3).

Таблица 4.3–Организационно-технические методы и технические средства (технические устройства) устранения (снижения) негативного воздействия опасных и вредных производственных факторов.

№ п/п	Опасный и / или вредный производственный фактор[18]	Организационно- технические методы и технические средства защиты, частичного снижения, полного устранения опасного и / или вредного производственного фактора[19]	Средства индивидуальной защиты работника [19]
1	движущиеся машины и механизмы	соблюдение всех требований безопасности при работе с инструментами; периодическая проверка технического состояния оборудования и используемых инструментов, повышенное внимание на рабочем месте.	соблюдение формы одежды

Проводится идентификация потенциальных источников возникновения пожара и выявленных опасных факторов пожара, с последующей разработкой модифицированных или альтернативных технических средств и/или организационных методов по обеспечению (улучшению) пожарной безопасности технического объекта. Возникающие пожары классифицируются по виду горючего материала и подразделяются на несколько классов. В нашем случае возможен пожар, связанный с воспламенением и горением жидкостей или плавящихся твердых веществ и материалов, в соответствие с этим фактором и [20] были выбраны класс пожара, опасные факторы пожара и сопутствующие проявления факторов пожара.

Таблица 4.4 – Идентификация классов и опасных факторов пожара.

№ п/п	Участок, подразделение	Оборудование	Класс пожара [20]	Опасные факторы пожара[20]	Сопутствующие проявления факторов пожара[20]
1	Лаборатория испытания механических свойств	установка Instron 8802	В	пламя и искры; тепловой поток; повышенная температура окружающей среды; повышенная концентрация токсичных продуктов горения и термического разложения	образующиеся токсичные вещества и материалы, попавшие в окружающую среду из разрушенных пожаром технологических установок, оборудования, агрегатов, изделий и иного имущества горящего технического объекта

Разработка технических средств и организационных мероприятий по обеспечению пожарной безопасности заданного технического объекта должна основываться на действующих нормативных документах [21].

Таблица 4.5 – Технические средства обеспечения пожарной безопасности.

Первичные средства пожаротушения [21]	Мобильные средства пожаротушения [21]	Стационарные установки систем пожаротушения [21]	Средства пожарной автоматики [21]	Пожарное оборудование [21]	Средства индивидуальной защиты и спасения людей при пожаре [21]	Пожарный инструмент (механизированный и немеханизированный) [21]	Пожарные сигнализация, связь и оповещение [21]
песок, пенный огнетушитель	Пожарная мотопомпа	Аэрозольная система пожаротушения	прибор управления пожарной системой	пожарный шкаф	противопожарные азы	Ломы, багры, топоры, лопаты, комплект диэлектрический	Автоматические извещатели

Организационные (организационно-технические) мероприятия по предотвращению пожара разрабатываются в соответствии с действующими нормативными документами [20]

Таблица 4.6 – Организационные (организационно-технические)

мероприятия по обеспечению пожарной безопасности.

Наименование технологическог о процесса, используемого оборудования в составе технического объекта	Наименование видов реализуемых организационных (организационно- технических) мероприятий [21]	Предъявляемые нормативные требования по обеспечению пожарной безопасности, реализуемые эффекты [21]
<p>Испытания титанового сплава ВТ-6 на твердость; Испытание титанового сплава ВТ-6 на усталость; Испытания титанового сплава ВТ-6 на твердость</p>	<p>Организация пожарной охраны, организация служб по пожарной безопасности в соответствии с законодательством; организация инструктажей по технике на производстве и общественных объектов пребывания людей; разработка и применение норм и правил по пожарной безопасности, инструкции по эксплуатации пожароопасных веществ, материалов, по соблюдению противопожарного режима и по действиям при возникновении пожароопасной ситуации</p>	<p>Устранение возникновения горючей среды должно быть обеспечено одним из следующих способов или их комбинаций: Максимально возможное использование негорючих и трудно горючих веществ и материалов; Максимальное применение механизированных и автоматизированных технологических процессов, использующих горючие вещества; Исключение условий для теплового, химического и микробиологического самовозгорания используемых веществ, материалов, изделий и конструкций.</p>

Для анализа негативных экологических факторов реализуемого производственно-технологического процесса (изготовления, транспортировки, хранения) и/или осуществляемой функциональной эксплуатации технического объекта с точки зрения обеспечения его экологической безопасности был изучен весь перечень нормативных

документов, предложенный в [21], и не было выявлено ни каких негативных экологических факторов.

Таблица 4.7 – Идентификация негативных экологических факторов технического объекта

Наименование технического объекта, производственно- технологического процесса	Структурные составляющие технического объекта, производственно- технологического процесса (производственного здания или сооружения по функциональному назначению, технологических операций, технического оборудования), энергетической установки, транспортного средства и т.п.	Негати вное эколог ическо е воздей ствие технич еского объект а на атмосф еру (выбро сы в воздуш ную окружа ющую среду)	Негативное экологичес кое воздействи е техническо го объекта на гидросферу (образующ ие сточные воды, забор воды из источников водоснабж ения)	Негативное экологическое воздействие технического объекта на литосферу (почву, растительный покров, недра, образование отходов, выемка плодородного слоя почвы, отчуждение земель, нарушение и загрязнение растительного покрова и т.д.)
Испытание титанового сплава ВТ-6 на усталость.	установка Instron 8802	-	-	-
Статическое растяжение титанового сплава ВТ-6	испытательная машина TiniusOlsen H50KT	-	-	-

Продолжение таблицы 4.7

Испытания титанового сплава ВТ-6 на твердость	Твердомер ТН 300	-	-	-
---	------------------	---	---	---

Разработка мероприятий по снижению негативного антропогенного воздействия на окружающую среду рассматриваемым техническим объектом, обеспечивающих соблюдение действующих (перспективных) требований нормативных документов является невозможным и не нужным.

Таблица 4.8 – Разработанные (дополнительные и/или альтернативные) организационно-технические мероприятия по снижению негативного антропогенного воздействия заданного технического объекта на окружающую среду.

Наименование технического объекта	-
Мероприятия по снижению негативного антропогенного воздействия на атмосферу	-
Мероприятия по снижению негативного антропогенного воздействия на гидросферу	-
Мероприятия по снижению негативного антропогенного воздействия на литосферу	-

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. При одном и тех же условиях нагружения долговечность образцов (количество циклов до разрушения) из сплава ВТ6 в исходном КЗ состоянии выше, чем после РКУП в УМЗ состоянии.
2. Прямолинейный участок на кинетических диаграммах усталостного разрушения сплава ВТ6 аппроксимируется уравнением Пэриса: для КЗ сплава $dl/dN = 7,6 \cdot 10^{-12} \Delta K^{3,6}$, а для УМЗ сплава $dl/dN = 2,5 \cdot 10^{-11} \Delta K^{3,3}$.
3. Доминирующим микрорельефом усталостных изломов сплава ВТ6, как в КЗ, так и в УМЗ состоянии является «чешуйчатый» микрорельеф; встречаются фасетки циклического скола. На начальных стадиях развития усталостной трещины чешуйки сравнительно гладкие; вблизи зоны долома видны усталостные бороздки. Долом образцов, независимо от состояния сплава, происходит с образованием гладких ямок.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. — М.: Логос, 2000. — 271 с.
2. Валиев Р. З. Развитие равноканального углового прессования для получения ультрамелкозернистых металлов и сплавов // Металлы. 2004. №1. С. 15–22.
3. В.Г. Ефременко. - Мариуполь «Основы повышения надежности и долговечности деталей машин»/ Приазовский государственный технический университет, 2007 – 17с.
4. Сопротивление Материалов и науки о прочности. [Электронный ресурс]
URL:http://mysopromat.ru/uchebnye_kursy/sopromat/ustalost/mehanizm_ustalostnogo_razrusheniya/(дата обращения: 28.05.2017).
5. Коцаньда С. Усталостное разрушение металлов. - М.: Металлургия, 1975. - 456 с.
6. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. - М.: Металлургия, 1976. - 456 с.
7. Иванова В.С., Шанявский А.А. Количественная фрактография. Усталостное разрушение. - Челябинск: Металлургия, 1988. -400 с.
8. Все о металлургии. [Электронный ресурс]. URL:<http://metal-archive.ru/metallurgiya/758-izmenenie-svoystv-metalla-v-processe-ekspluatacii.html>дата обращения: 28.05.2017).
9. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. С. 479—483. ISBN 5-7038-1340-9.
10. Плюксне Н. И. Прочность при переменных напряжениях: В 2 ч.: Метод.пособие. – Х.: Харьк. политехн. ин-т, 1962. – Ч. 1. Усталость металлов. Факторы, влияющие на усталостную прочность.– 75 с.

11. Плюксне Н. И. Прочность при переменных напряжениях: В 2 ч.: Метод.пособие. – Х.: Харьк. политехн. ин-т, 1962. – Ч. 2. Расчеты на прочность. – 56 с.
12. Соппротивление усталости элементов конструкции / А. З. Воробьев, Б. И. Олькин, В. Н. Стебнев, Т. С. Родченко. – М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.
13. Диагностика металлов/ Горицкий В.М.–Металлургиздат ISBN: 5-902194-11-3– 2004. –408 с.
14. Fatigue Life and Failure Characteristics of an Ultrafine-Grained Ti–6Al–4V Alloy Processed by ECAP and Extrusion /Alexander V. Polyakov,* Irina P. Semenovaидр. // ADVANCED ENGINEERING MATERIALS 2014– 16– No. 8 – С.1038– 1043
15. High-Cycle Fatigue Behavior of an Ultrafine-Grained Ti–6Al–4V Alloy Processed by ECAP and Extrusion/ Irina P. Semenova, Alexander V. Polyakovидр.// ADVANCED ENGINEERING MATERIALS 2016–DOI: 10.1002/adem.201500630–С.1–6.
16. Дж. Гоулдстейн и Х.Яковиц. Практическая растровая электронная микроскопия. Издательство «Мир», Москва 1978г. Постановления Госстандарта РФ от 26.12.1994 №367 (ред. от 19.06.2012)
17. ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ Опасные и вредные производственные факторы. Классификация [Текст].
18. ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности.
19. «Безопасность и экологичность технического объекта» Учебно-методическое пособие Проектирование: Учеб.пособие/ ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».
20. Приказ министерства здравоохранения и социального развития российской федерации от 14 декабря 2010 г. № 1104н

21. ГОСТ Р 12.3.047-2012 Национальный стандарт Российской Федерации. ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля.