

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

Институт машиностроения

(наименование института)

Нанотехнологии, материаловедение и механика

(наименование кафедры)

22.03.01 Материаловедение и технологии материалов

(код и наименование направления подготовки / специальности)

Современные материалы и технологии их производства

(направленность (профиль) / специализация)

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Разработка технологии упрочнения ультразвуковых волноводов  
из алюминиевого сплава Д16Т

Обучающийся

А.В. Учаев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент А.С. Селиванов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

## Аннотация

Выпускная квалификационная работа посвящена разработке технологии упрочнения волноводов для ультразвуковых колебательных систем из алюминиевого сплава Д16Т.

Представлены актуальность, цель, обоснование и задачи исследования.

Основным объектом исследования являются волноводы из алюминиевого сплава Д16Т, а исследование включает в себя разрушение деталей на специализированном оборудовании, а также фрактографический анализ трещин.

Первый раздел состоит из аналитического обзора литературы, который охватывает такие темы, как алюминиевый сплав Д16Т, волноводы, дефекты, которые могут появиться, определение механических свойств алюминиевых сплавов, а также состав и механизм работы деталей инструмента.

Второй раздел представляет собой материалы исследования, то есть волноводы, методики проведения исследований для получения необходимой информации. Также в текущем разделе описаны устройства и оборудование используемое для изучения.

В третьем разделе приведены основные выводы по выполненной работе на основе результатов исследуемых волноводов. А также построены эпюры напряжений по проанализированным данным.

## **Abstract**

This graduated work focuses on the development of a technology for hardening waveguides made of aluminum alloy D16T.

The relevance, purpose, justification, and objectives of the research are introduced.

The primary object of the study is waveguides made of titanium alloy D16T, and the research includes fracturing of parts on specialized equipment, as well as fractographic analysis of cracks.

The first chapter consists of an analytical literature review, which covers topics such as titanium alloy D16T, waveguides, defects that may appear, determination of mechanical properties of aluminum alloys, and the composition and mechanism of the tool parts.

The second chapter presents the materials of the study, i.e. waveguides, research methods for obtaining the necessary information. Also in the current chapter the devices and equipment used for the study are described

The third chapter presents the main conclusions of the work done on the basis of the results of the waveguides studied. And also the stress diagrams of the analyzed data are built.

## Содержание

Введение.....	5
1 Анализ исходных данных. Постановка проблемы исследования.....	7
1.1 Волноводы и технологии с применением ультразвука .....	7
1.2 Проектирование ультразвуковых колебательных систем.....	10
2. Анализ причин разрушения волноводов для ультразвуковых колебательных систем .....	17
2.1. Влияние циклических нагрузок на механизм разрушения твердых тел	17
2.2 Механизмы разрушения кристаллических материалов при циклическом нагружении .....	27
2.3 Основные причины разрушения волноводов .....	30
3. Разработка технологии упрочнения волноводов из алюминиевого сплава Д16Т33	
3.1 Методика экспериментального исследования.....	33
3.2 Результаты экспериментального исследования .....	34
Заключение.....	39
Список используемой литературы.....	41

## Введение

Основной задачей современной промышленности, является не только модернизация существующих производственных технологий, но и создание новых. Ультразвуковые технологии играют важную роль в области модернизации многих технологических процессов. Ультразвуковые технологии используются во многих областях человеческой деятельности, и процессы, улучшенные с помощью высокоэнергетических ультразвуковых колебаний, можно разделить на три группы в зависимости от типа среды, в которой они существуют [1, 2].

Первая группа включает процессы, в которых в качестве среды используются твердые или термопластичные материалы, например, ультразвуковая сварка. Ультразвуковые колебания высокой интенсивности используются для сварки полимерных термопластичных материалов, обеспечивая отличную герметичность при сварке полиэтиленовых труб и коробок для банок. Ультразвуковая сварка также используется для приваривания тонкой фольги или проволоки к металлическим деталям. Этот метод называется холодной сваркой, поскольку шов образуется при температуре ниже точки плавления. Этим методом можно сваривать различные металлы, включая алюминий, тантал, цирконий, ниобий и молибден.

Вторая группа включает процессы, связанные с обработкой жидких сред, например, ультразвуковую очистку. Ультразвуковая очистка - это самый быстрый и эффективный способ очистки поверхностей от различных загрязнений, включая труднодоступные места. Ультразвуковая очистка позволяет заменить высокотоксичные, легковоспламеняющиеся и дорогостоящие растворители обычной водой. Высокочастотные ультразвуковые колебания создают в жидкости мельчайшие пузырьки, которые превращаются в мощную струю, смывающую грязь. Этот принцип используется в современных стиральных машинах и небольших стиральных

машинах. Ультразвук в жидкости способен уничтожать микроорганизмы, благодаря чему широко применяется в медицине и микробиологии.

Третья группа - это интенсификация процессов в газообразных средах. Ультразвуковая технология может удалять газ из металлов в расплавленном состоянии, что может привести к ухудшению качества металла. Эта технология широко применяется в металлургическом производстве в нашей стране, причем для специальной ультразвуковой технологии используются волноводы различной сложности [2].

Для проектирования волноводов требуется немалое терпение, так как это непростое дело, к которому предъявляются высокие требования, которые влияют на сложность и стоимость создания волновода

Цель работы – повышение усталостной прочности ультразвуковых волноводов из алюминиевого сплава Д16Т.

Задачи:

- обзор научной литературы;
- выбор методик и оборудования;
- разработка технологии упрочнения на основе полученных данных исследования волноводов.

# 1 Анализ исходных данных. Постановка проблемы исследования

## 1.1 Волноводы и технологии с применением ультразвука

Основой эффективной реализации ультразвуковых технологических процессов в различных отраслях промышленности являются ультразвуковые колебательные системы (УЗКС), представляющие собой звенья преобразования электрической энергии в механическую с заданной частотой колебаний. Типовые звенья УЗКС подразделяются на преобразователи, выполняемые на базе магнитоскрипционного или пьезо-эффектов, бустеров и собственно ультразвуковых волноводов. На рисунке 1 представлена схема основных звеньев УЗКС на базе пьезопреобразователя.

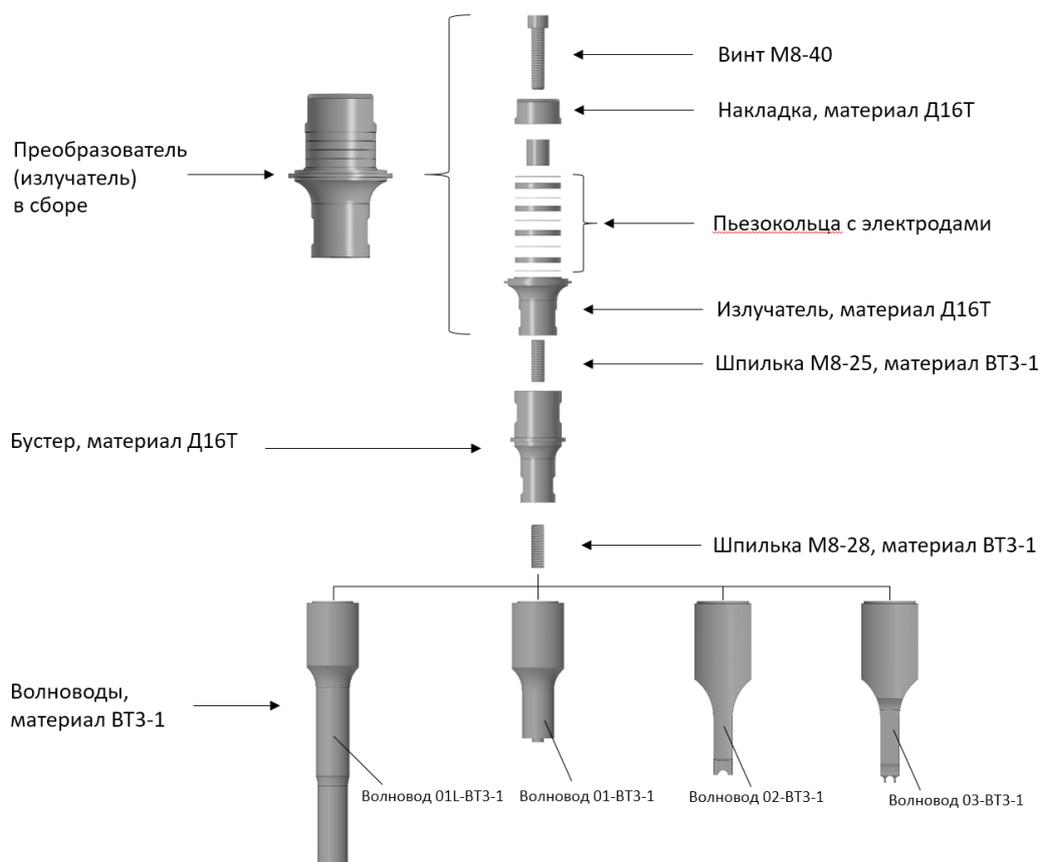


Рисунок 1 – Типовая схема ультразвуковой колебательной системы на

базе пьезопреобразователя

На рисунке 2 представлено фото УЗКС на базе магнитострикционного преобразователя.



Рисунок 2 – УЗКС на базе магнитострикционного преобразователя

Основные требования, предъявляемые к УЗКС, заключаются в том, чтобы все составляющие звенья работали в резонансе при возбуждении в них вынуждающей силы.

Ниже приведены элементы конструкции ультразвуковой системы:

- ультразвуковой преобразователь является основным компонентом вибрационной системы. Он преобразует электрическую энергию в механические колебания с помощью пьезоэлектрического кристалла. Кристалл вибрирует на высокой частоте (обычно от 15 кГц до 100 кГц), генерируя механические волны, которые передаются на обрабатываемые материалы.
- усилитель - это дополнительный компонент, который усиливает амплитуду колебаний, генерируемых преобразователем. Он работает

за счет изменения механического сопротивления системы, что позволяет более эффективно передавать вибрации на обрабатываемый инструмент или заготовку.

- рупор - это компонент, который еще больше усиливает амплитуду колебаний и передает их на обрабатываемый инструмент или заготовку. Обычно он изготавливается из высокопрочного материала, такого как титан или алюминий, и предназначен для резонанса на той же частоте, что и ультразвуковой преобразователь.
- наковальня или заготовка - это деталь, которая обрабатывается с помощью ультразвуковых колебаний. Обычно она помещается в контакт с рупором и подвергается воздействию высокочастотных механических колебаний, которые могут использоваться для сварки, резки или очистки материала.
- генератор - это электрический компонент системы, который обеспечивает питание ультразвукового преобразователя. Он отвечает за генерацию высокочастотного электрического сигнала, который приводит в движение пьезоэлектрический кристалл.
- система управления отвечает за регулирование выходного сигнала ультразвуковой вибрационной системы. С ее помощью можно регулировать частоту, амплитуду и продолжительность колебаний, а также контролировать различные параметры, такие как температура и давление.

Конструкция ультразвуковой вибрационной системы может варьироваться в зависимости от конкретного применения и обрабатываемых материалов. Такие факторы, как размер и форма рупора и тип используемого преобразователя, могут оказать значительное влияние на производительность системы. В целом, однако, ультразвуковые вибрационные системы разработаны для обеспечения высокой эффективности и надежности, с минимальными требованиями к техническому обслуживанию и длительным сроком службы [15].

## 1.2 Проектирование ультразвуковых колебательных систем

Создание УЗКС с помощью эмпирических формул, основанных на экспериментальных данных, является сложной и трудоемкой задачей. Поэтому точность расчетов может быть подтверждена только путем изготовления рассчитанной колебательной системы [16].

Процесс создания волновода подразумевает следующие пункты:

- расчет напряжений волновода;
- проектирование 3D модели;
- реализация разработанной модели;
- изучение характеристик разработанной модели;
- корректировка модели на основе полученных данных.

Создание 3D модели происходит в программе AutoCAD, затем для моделирования процессов используется программа ANSYS (рисунок 3).

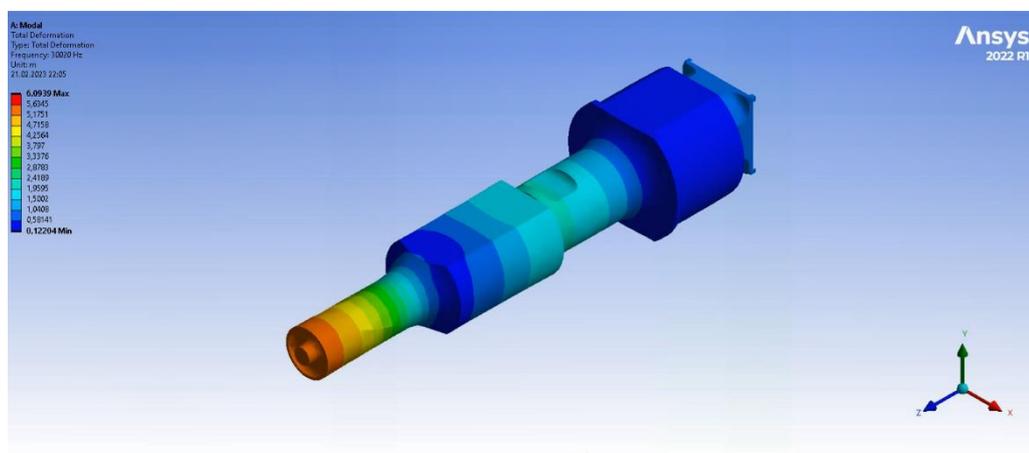


Рисунок 3 – Моделирование работы ультразвукового волновода в ANSYS

При работе ультразвуковой сварочной системы волновод подвергается циклической нагрузке из-за высокочастотных механических колебаний, которые передаются через него. Эта циклическая нагрузка может вызвать

концентрацию напряжений в определенных областях волновода, что может привести к образованию трещин и в конечном итоге к разрушению волновода [10].

На распределение напряжений в волноводе влияет несколько факторов, включая геометрию волновода и расположение точек концентрации напряжений. Например, точки концентрации напряжений обычно расположены на границах раздела между различными компонентами ультразвуковой системы, например, между рупором и наковальней или заготовкой [12].

Свойства материала сплава Д16Т также играют роль в определении распределения напряжений на волноводе. Д16Т - это высокопрочный алюминиевый сплав, который обычно используется в аэрокосмической промышленности и других высокопроизводительных областях. Он имеет относительно высокий предел текучести и низкий коэффициент теплового расширения, что может повлиять на его реакцию на циклическое нагружение.

При циклической нагрузке распределение напряжений в волноводе может меняться в зависимости от условий нагрузки и частоты механических колебаний. В целом, распределение напряжений наиболее высоко в точках концентрации напряжений и уменьшается по мере увеличения расстояния от этих точек.

Для предотвращения разрушения волновода важно спроектировать систему ультразвуковой сварки таким образом, чтобы точки концентрации напряжений были сведены к минимуму, а распределение напряжений на волноводе было как можно более равномерным. Этого можно достичь путем тщательного проектирования компонентов системы, включая рупор, наковальню или заготовку, а также сам волновод. Кроме того, надлежащее техническое обслуживание и проверка системы могут помочь обнаружить и предотвратить разрушение волновода до того, как оно произойдет [6].

Прогресс современных технологий привел к созданию материалов с

выдающимися эксплуатационными характеристиками. Свойства Д16Т позволяют использовать его в производстве широкого спектра конструкций и механизмов [8].

Д16Т - это тип высокопрочного алюминиевого сплава, который обычно используется в аэрокосмической и конструкционной технике. Он известен своим превосходным соотношением прочности и веса, коррозионной стойкостью и долговечностью, что делает его идеальным материалом для использования в широком спектре приложений.

Идентификация марки Д16Т позволяет определить ее основные эксплуатационные характеристики и химический состав. Д16Т относится к типу дюралюминия, который имеет высокую концентрацию легирующих элементов.

Буква "Д" указывает на то, что материал относится к группе дюралюминия, который отличается от обычного алюминия наличием различных легирующих элементов. Концентрация этих химических элементов может изменять многие эксплуатационные характеристики. Этот тип алюминиевого сплава, был впервые разработан в начале 20-го века. Дюралюминий известен своей высокой прочностью и легким весом, и он использовался в различных областях, включая самолетостроение и структурную инженерию.

Цифра "16" означает номер сплава, который не указывает на какие-либо конкретные характеристики, но используется для идентификации сплава с определенными свойствами.

Буква "Т" обозначает процесс закалки и естественного старения. Процесс термообработки включает в себя воздействие высоких температур, в результате чего происходит перестройка поверхностного слоя.

Д16Т - это алюминиевый сплав, относящийся к группе Al-Cu-Mg с легированием марганцем. Его химический состав состоит в основном из алюминия, его концентрация составляет 94,7%. Остальная часть массы состоит из магния, меди и различных примесей.

Помимо алюминия, сплав также содержит около 4,5% меди. Медь - это высокопроводящий металл, который часто используется в сплавах для повышения их прочности и долговечности. В сплаве Д16Т добавление меди способствует повышению прочности сплава, что делает его идеальным для использования в тех областях, где высокая прочность является критически важным фактором.

Он также содержит меньшее количество других элементов, включая магний, марганец и кремний. Магний добавляется для повышения прочности и коррозионной стойкости сплава, а марганец помогает улучшить его обрабатываемость и другие механические свойства. Кремний добавляется для улучшения характеристик литья и других свойств сплава.

Добавление марганца значительно повышает коррозионную стойкость Д16Т и улучшает некоторые его механические свойства. В состав также входит небольшое количество титана и железа. Однако концентрация железа должна быть строго ограничена, так как оно не растворяется в алюминии и может создавать неоднородные пластины, что приводит к потенциальным проблемам со структурой.

Точный состав сплава может варьироваться в зависимости от конкретного применения и используемого производственного процесса. Однако вышеперечисленные элементы обычно присутствуют в схожих пропорциях в большинстве сплавов Д16Т.

В таблице 1 представлен химический состав в % материала Д16Т.

Одним из ключевых преимуществ Д16Т является высокое соотношение прочности и веса, что делает его идеальным материалом для использования в аэрокосмической промышленности и других областях, где вес является критическим фактором. Кроме того, Д16Т обладает высокой устойчивостью к коррозии, что делает его идеальным для использования в суровых условиях, где другие материалы могут быть подвержены ржавчине или другим формам деградации.

Таблица 1 – Химический состав в % материала Д16Т

Элемент	Количество, %
Fe	до 0,5
Si	до 0,5
Mn	0,3-0,9
Cr	до 0,1
Ti	до 0,15
Al	90,9-94,7
Cu	3,8-4,9
Mg	1,2-1,8
Zn	до 0,25
Примеси	прочие, каждая по 0,05, всего 0,15

Сплав Д16Т широко используется в различных отраслях промышленности благодаря своим исключительным эксплуатационным характеристикам. Он находит применение в таких отраслях, как нефтяная, химическая, судостроительная, автомобильная и авиастроительная. Сплав используется для сборки корпусов, обшивки, стержней, лонжеронов и каркасов автомобилей, судов, самолетов и космического оборудования. Кроме того, он используется для производства рекламных щитов, уличных и дорожных знаков. Дюралюминий - незаменимый материал для современных производственных машин, и его детали находят широкое применение. Этот материал хорошо зарекомендовал себя в нефтяной промышленности: из Д16Т

производят нефтяные трубы и другое оборудование, которое может служить бесперебойно и безотказно до восьми лет. В области ультразвуковых технологий Д16Т используется для производства волноводов различной сложности [18].

В процесс эксплуатации ультразвуковых колебательных систем возможен их выход из строя по причине появления в них усталостных трещин. Как показывает практика использования УЗКС трещины могут зарождаться и развиваться в местах образования пучности напряжений вследствие колебаний и формирования стоячей волны в звеньях УЗКС. На рисунке 4 представлен пример теоретического расчета эпюры распределения напряжений по длине ультразвукового волновода.

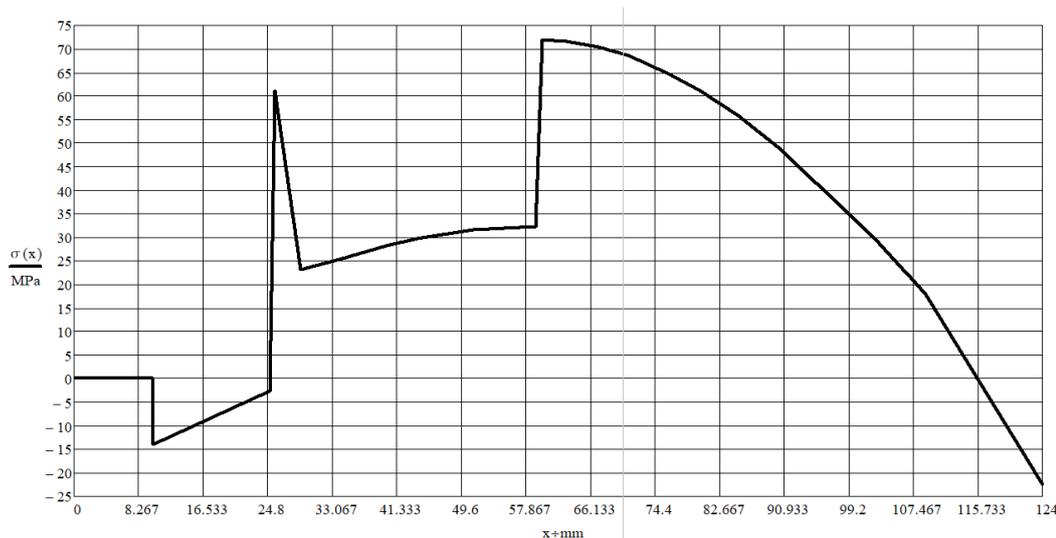


Рисунок 4 – Эпюра напряжений в ультразвуковом волноводе

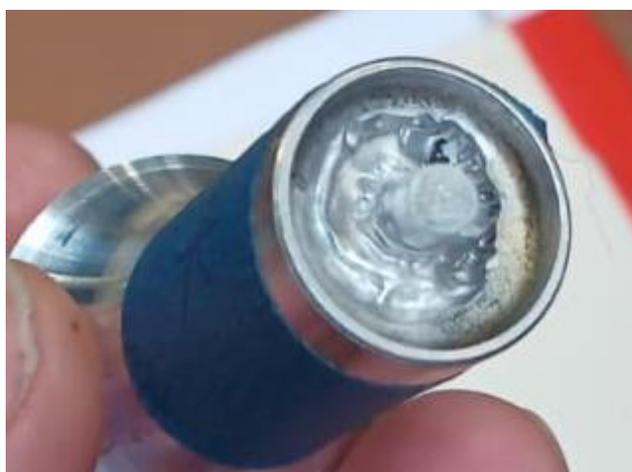
Как следует из анализа рисунка максимальные напряжения возникают в местах концентрации напряжений, а в конструкции волноводов этими местами являются резьбовые участки и места перехода от одного диаметра к другому.

На рисунке 5 представлены некоторые фотографии разрушенных ультразвуковых волноводов после определенного периода эксплуатации на

автоматической линии ультразвуковой сварки на АО «АВТОВАЗ»



а)



б)



в)

Рисунок 5 – Примеры разрушения ультразвуковых волноводов из  
алюминиевого сплава Al7075 (а,б,в)

## **2 Анализ причин разрушения волноводов для ультразвуковых колебательных систем**

### **2.1 Влияние циклических нагрузок на механизм разрушения твердых тел**

Когда твердый материал подвергается циклическим нагрузкам, в нем происходит процесс деформации и разрушения, который можно разделить на несколько этапов. Первая стадия - зарождение трещин, когда циклическая нагрузка создает небольшие микротрещины на поверхности материала. Эти микротрещины обычно не видны невооруженным глазом и не оказывают существенного влияния на общую прочность материала. Однако по мере увеличения числа циклов эти микротрещины начинают расти и сливаться друг с другом, что приводит ко второй стадии процесса - распространению трещин. На этом этапе скорость роста трещин зависит от свойств материала, условий нагружения и условий окружающей среды. Наконец, когда микротрещины вырастают до критического размера и сливаются, образуя макроскопическую трещину, материал разрушается катастрофически на третьей и последней стадии.

На механизм усталостного разрушения могут влиять несколько факторов, включая свойства материала, условия нагружения, условия окружающей среды и микроструктуру. Например, материалы с высокой прочностью, хорошей пластичностью и высокой вязкостью разрушения более устойчивы к усталостному разрушению. Аналогично, снижение частоты, амплитуды и среднего напряжения циклических нагрузок может продлить усталостный срок службы материала. Кроме того, контроль размера зерна, текстуры и дефектов микроструктуры материала может повысить его устойчивость к усталостному разрушению [5].

Для предотвращения усталостного разрушения твердых тел можно использовать несколько стратегий. Один из подходов заключается в выборе материалов с высокой прочностью, хорошей пластичностью и высокой вязкостью разрушения. Другой подход заключается в снижении частоты, амплитуды и среднего напряжения циклических нагрузок. Кроме того, контроль условий окружающей среды, например, минимизация воздействия коррозионных агентов, высокой температуры и влажности, может замедлить процесс зарождения и распространения трещин. Наконец, изменение микроструктуры материала, например, контроль размера зерна, может повысить его устойчивость к усталостному разрушению [4].

«Усталостное разрушение возникает во время действия напряжений, которые меньше предела прочности при условии неизменной нагрузки на объект. Неоднократные повторяющиеся нагрузки вызывают постепенное увеличение локальных повреждений в металле, переходящих в трещинки, которые в свою очередь, увеличиваясь, образуют макроскопическую трещину. Далее подъем усталостной трещины регулируется коэффициентами интенсивности напряжения у её верхушки. По мере возрастания усиленного напряжения, меняется положение материала у верхушки трещины» [11].

«Возникновение усталостных трещин случается в области на плоскости или же близко к плоскости образцов или же деталей, где от нагрузок возможно закрепить пик напряжений. Трещины зарождаются на каждой поверхности, в том числе и абсолютно на гладких полированных. При наличии концентраторов напряжений облегчается процесс появления трещин» [11].

«Полосы локального скольжения образуются при условии воздействия повторяющихся нагрузок. Полосы локального скольжения предполагают области с рельефными участками. Месторасположение рельефных участков, обосновано связью с неоднородностью структуры, подобный примесям и легирующим составляющим, а еще методами получения данных материалов» [11].

«При дальнейшем росте усталостных микротрещин в области нескольких зёрен начинается стадия роста усталостной макротрещины» [16]. В данном случае распространение трещины произойдет в перпендикулярном направлении приложения напряжения. Высокие циклические нагрузки образуют несколько микротрещин, которые могут соединяться по мере распространения. В результате слияния микротрещин могут образовываться гребни и полосы сдвига, трещины сонаправленные магистральной трещине, в центральной области разрушения.

«Трещины продвигаются вперёд на определённое расстояние под действием циклических нагрузок на стадии распространения усталостной трещины. Усталостные бороздки появляются при усталостных трещинах, и они обусловлены рядом полосок. Так же бороздки могут отображать положение фронта трещины за каждый цикл нагружения на объект. От природы материала, а также от величины и характера нагрузки зависит профиль некоторых бороздок. Степень четкости выявления бороздок определяется проникающей в трещину окружающей средой и связанным с этим последующим образованием на поверхности излома характерного налета. Наиболее популярная модель роста, отображающая усталостные трещины с образованием бороздок, принадлежит Лейрду и Смиуту» [23].

«Исходя из этой модели, возникновение усталостных бороздок обусловлено последовательным сжатием и расширением у боковых поверхностей трещины. Трещина движется под влиянием растягивающих напряжений, отчего происходит расширение устья трещины. Трещина подвергается сплющиванию при сжимающих напряжениях, что в свою очередь служит зарождением усталостной бороздки. Присутствие на поверхности излома усталостных бороздок, однозначно свидетельствует о том, что имеет место усталостному разрушению. Сами бороздки: расстояние между бороздками, количество бороздок, а, в отдельных случаях, и профиль бороздок широко используют в практике диагностики усталостного разрушения, чтобы можно было определить номинальное напряжение цикла,

а также скорость распространения трещины и других параметров разрушения» [11].

К отличительным характеристикам усталостного разрушения относится образование пластических зон во время его распространения. В теоретической модели Райса, могут образовываться монотонные зоны близ вершин усталостной трещины при циклическом нагружении, все эти дефекты могут образовываться на ранних стадиях нагружения.

Теоретическая модель Райса для циклической деформации показывает образование монотонной зоны вблизи вершины усталостной трещины, которая появляется на ранних стадиях нагружения, и циклической зоны.

«В случае если вверху распространяющейся трещины появляются большие по величине напряжения сжатия, и при этом впереди трещинки есть растягивающие напряжения, появляется повторяющаяся пластическая зона. В собственную очередь однообразная пластическая зона связана с предельными растягивающими напряжениями, действующими у верхушки усталостной трещинки» [11].

«Механизм разрушения хрупких материалов при ультразвуковом воздействии связан с «накачкой» вакансий со свободной поверхности и границ зерен в локальные области кристалла, образованием вакансионных скоплений и их схлопыванием в призматические дислокационные петли»[6].

На рисунке 6 показан внешний вид волновода №1 с трещиной. Исследовав трещину, обнаружено, что она привела к разрушению.

Области расположены на различных плато, также место зарождения усталостной трещины не ограничено только поверхностью исследуемого волновода и располагается внутри, как показано на рисунке 7.

Причина важности последнего заключается в том, что зарождение усталостных трещин при мегациклической усталости происходит из-за дефектов металла, таких как микропоры и неметаллические включения. В результате усталостное разрушение ультразвуковых волноводов можно рассматривать как мегациклическую усталость.

Поэтому к металлу, используемому для изготовления ультразвуковых волноводов, должны предъявляться повышенные требования по качеству.



Рисунок 6 – Внешний вид волновода №1



Рисунок 7 – Внешний вид излома волновода 1 справа

На рисунке 8 показан микрорельеф поверхности разрушения в средней части зоны усталости.

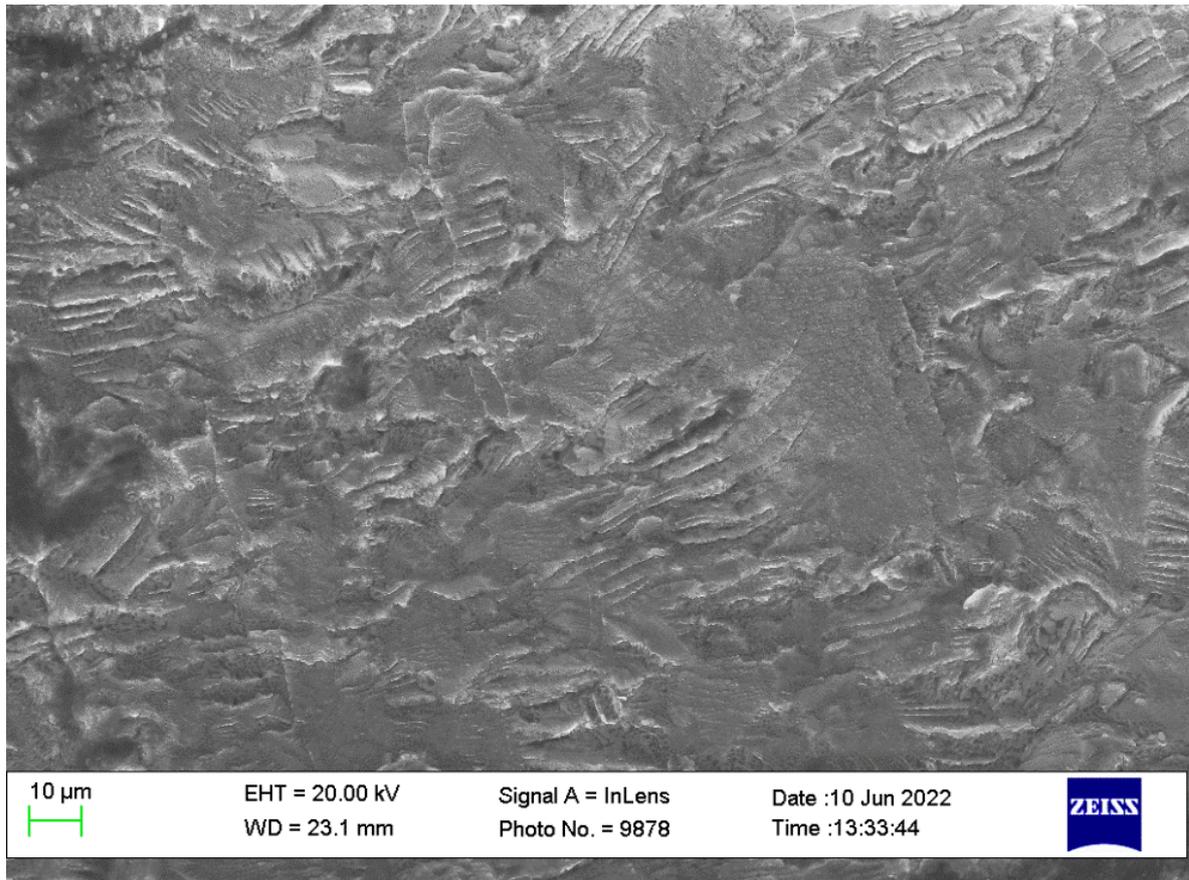


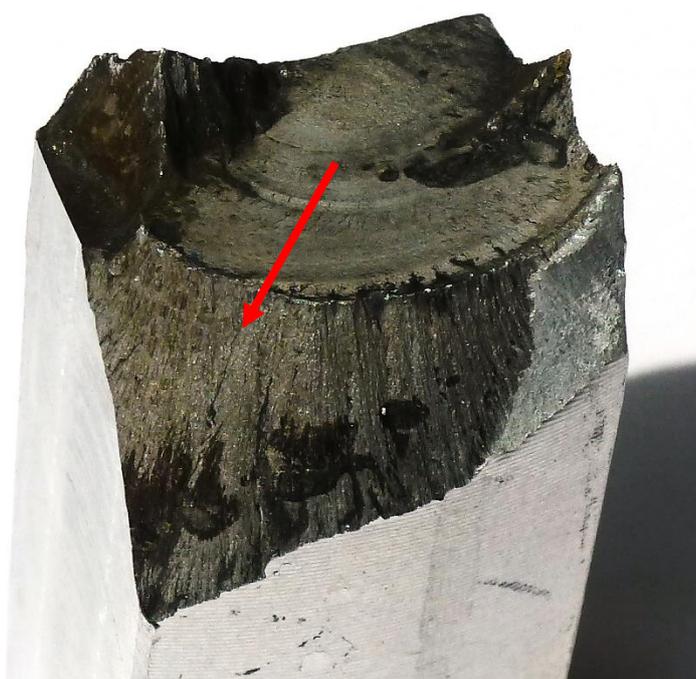
Рисунок 8 – Микрорельеф поверхности разрушения в средней части зоны усталости показывает направление распространения трещины слева направо  $\times 500$

На поверхности усталостного разрушения волнопроводов из алюминиевого сплава Д16Т (волновод №1) микрорельеф редко встречается и состоит из параллельных полос, напоминающих усталостные канавки. Кроме того, между полосами, перпендикулярно им, имеются небольшие канавки. Образование этого микрорельефа до сих пор неизвестно, и неизвестно, отражает ли он положение фронта трещины для каждого цикла нагружения.

На рисунке 9 показан общий вид волновода 2, в котором имеется трещина, выделенная синим цветом. При раскрытии трещины видна усталостная трещина. Концентрические макрополосы на поверхности трещины указывают на то, что место зарождения трещины наблюдается под непосредственной поверхностью исследуемого волновода. На рисунке 10 представлено направление, в котором распространялась усталостная трещина.



Рисунок 9 – Общий вид волновода 2 с трещиной



¶

## Рисунок 10 – Излом волновода № 2 из сплава Д16Т

Вблизи места, где начинает формироваться усталостная трещина, присутствует характерный рисунок поверхности. Узор, наблюдаемый на поверхности усталостного разрушения, состоит из полос, напоминающих усталостные канавки. Эти полосы параллельны направлению распространения усталостной трещины, а между ними имеются небольшие канавки, расположенные перпендикулярно полосам. При просмотре под большим увеличением становится видно, что эти маленькие канавки иногда пересекаются с полосами, а иногда прерываются ими. По мере дальнейшего распространения усталостной трещины в дополнение к ранее упомянутому рисунку поверхности становятся видны более гладкие участки с небольшими усталостными канавками. Эти участки расположены в зоне, где трещина развивается быстрее, как показано на рисунках 11, 12.

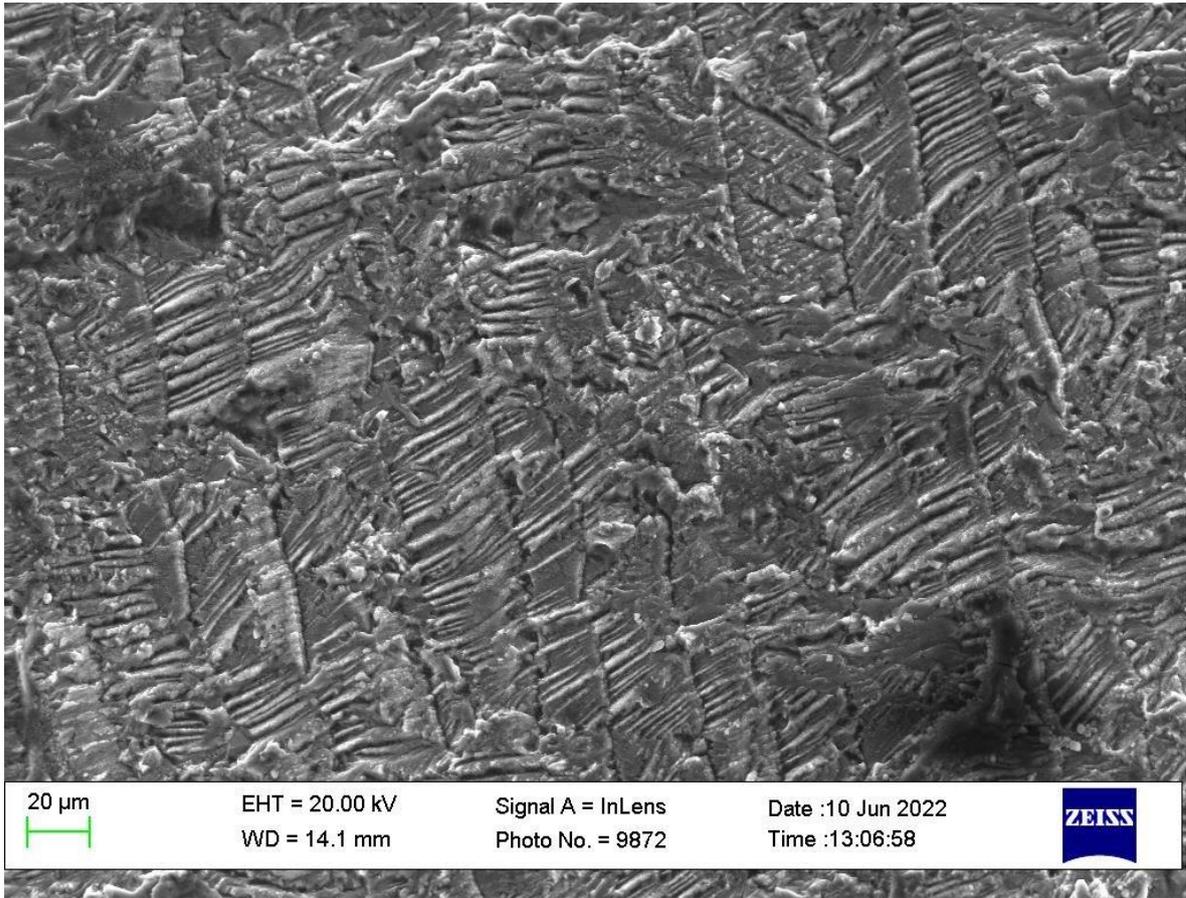


Рисунок 11 – Микрорельеф поверхности излома вблизи очага разрушения.  
Направление распространения трещины слева направо. x300

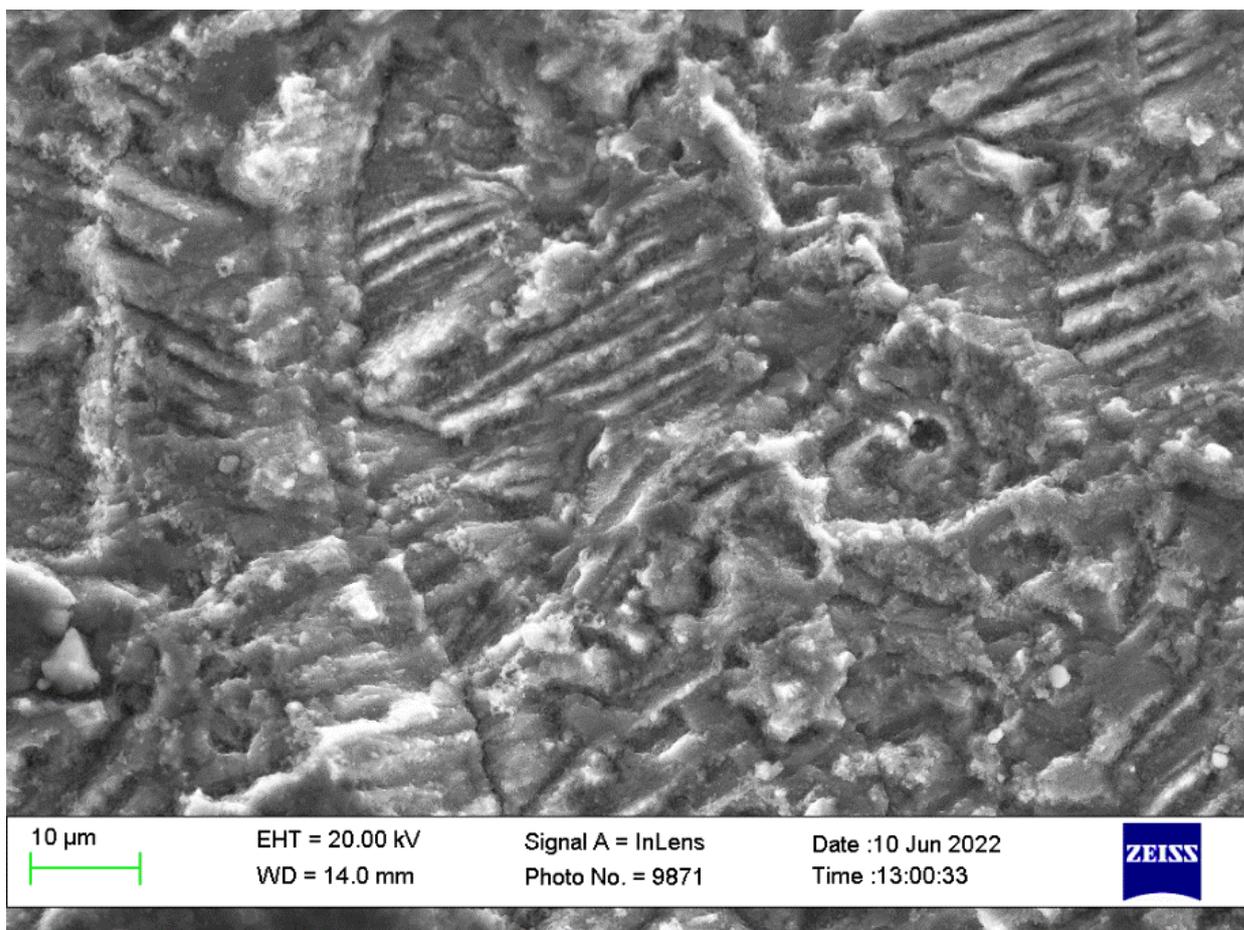


Рисунок 12 – Микрорельеф поверхности излома вблизи очага разрушения.  
Направление распространения трещины слева направо, x1000

Усталостное разрушение волноводов из алюминиевого сплава Д16 при ультразвуковых колебаниях можно классифицировать как мегациклическую усталость, которая инициируется дефектами металла, такими как микропоры и неметаллические включения. Поэтому необходимо предъявлять более строгие требования к контролю качества и чистоты металла, используемого для изготовления ультразвуковых колебательных систем и волноводов для массового производства при ультразвуковой сварке. Было обнаружено, что в микроструктуре алюминиевого сплава D16T присутствуют неметаллические включения, которые, как известно, являются причиной зарождения трещин во время мегациклической усталости при ультразвуковых колебаниях.

## **2.2 Механизмы разрушения кристаллических материалов при циклическом нагружении**

Кристаллические материалы широко используются в инженерных конструкциях и компонентах благодаря своей высокой прочности и жесткости. Однако при циклическом нагружении эти материалы могут испытывать усталостное разрушение, что может значительно сократить срок их службы. Когда кристаллический материал подвергается циклическому нагружению, он проходит ряд сложных процессов деформации и разрушения, которые в конечном итоге могут привести к разрушению. На эти процессы может влиять множество факторов, включая свойства материала, условия нагружения, условия окружающей среды и микроструктуру.

На микроскопическом уровне циклическая нагрузка может вызвать образование и рост микроскопических трещин, которые в конечном итоге могут объединиться и привести к образованию более крупных трещин. Эти трещины могут распространяться по материалу, вызывая его деформацию и в конечном итоге разрушение.

Одним из ключевых факторов, который может способствовать разрушению при циклическом нагружении, является наличие дефектов в материале, таких как пустоты, включения или дислокации. Эти дефекты могут действовать как точки концентрации напряжений, делая материал более восприимчивым к образованию и распространению трещин [20, 21, 22].

Еще одним важным фактором является микроструктура материала, которая может влиять на его механические свойства и реакцию на циклические нагрузки. Например, материалы с мелкозернистой микроструктурой могут быть более устойчивы к разрушению при циклическом нагружении, чем материалы с крупнозернистой микроструктурой.

Кроме того, факторы окружающей среды, такие как температура,

влажность и коррозионные агенты, также могут влиять на механизмы разрушения кристаллических материалов при циклическом нагружении. Например, высокие температуры могут вызвать термическую усталость и ускорить рост трещин, а коррозионные агенты могут вызвать коррозионную усталость и снизить прочность материала.

«Усталостное разрушение происходит при напряжениях, меньших предела прочности при условии постоянного нагрузки на объект. Многократные повторяющиеся нагрузки вызывают постепенное накапливание локальных повреждений в металле, переходящих в трещины, которые, увеличиваясь, образуют макроскопическую трещину. Дальше рост усталостной трещины регулируется коэффициентами интенсивности напряжения у её вершины. По мере возрастания интенсивного напряжения, изменяется состояние материала у вершины трещины» [11].

«Появление усталостных трещин происходит в области на поверхности или вблизи к поверхности образцов или деталей, где от нагрузок можно зафиксировать пик напряжений. Трещины зарождаются на любых поверхностях даже совершенно на гладких полированных. При наличии концентраторов напряжений облегчается процесс возникновения трещин» [11].

«Полосы локального скольжения образуются при условии действия циклических нагрузок. Полосы локального скольжения представляют собой области с рельефными участками. Расположение рельефных участков, обусловлено взаимосвязью с неоднородностью структуры, такой как примеси и легирующие элементы, а также способами получения этих материалов» [6].

«При дальнейшем росте усталостных микротрещин в области нескольких зёрен начинается стадия роста усталостной макротрещины. Тут трещина распространяется под прямым углом к направлению приложенного напряжения. Бывает, что при особенно больших напряжениях цикла, сразу могут образоваться несколько микротрещин, которые распространяясь,

параллельно соединяются между собой, образуя вблизи очага разрушения ступени сдвига и гребни, параллельные направлению развитию трещины» [6].

«Трещины продвигаются вперёд на определённое расстояние под действием циклических нагрузок на стадии распространения усталостной трещины. Усталостные бороздки появляются при усталостных трещинах, и они обусловлены рядом полосок. Так же бороздки могут отображать положение фронта трещины за каждый цикл нагружения на объект. От природы материала, а также от величины и характера нагрузки зависит профиль некоторых бороздок. Степень четкости выявления бороздок определяется проникающей в трещину окружающей средой и связанным с этим последующим образованием на поверхности излома характерного налета. Наиболее популярная модель роста, отображающая усталостные трещины с образованием бороздок, принадлежит Лейрду и Смиуту» [6].

«Исходя из этой модели, возникновение усталостных бороздок обусловлено последовательным сжатием и расширением у боковых поверхностей трещины. Трещина движется под влиянием растягивающих напряжений, отчего происходит расширение устья трещины. Трещина подвергается сплющиванию при сжимающих напряжениях, что в свою очередь служит зарождением усталостной бороздки. Присутствие на поверхности излома усталостных бороздок, однозначно свидетельствует о том, что имеет место усталостному разрушению. Сами бороздки: расстояние между бороздками, количество бороздок, а, в отдельных случаях, и профиль бороздок широко используют в практике диагностики усталостного разрушения, чтобы можно было определить номинальное напряжение цикла, а также скорость распространения трещины и других параметров разрушения» [24].

«Можно отметить, отличительные особенности, что при прохождении усталостного разрушения проявляются, формируются пластические зоны. Используя теоретическую модель Райса при циклическом деформировании у

вершины усталостной трещины, образуется монотонная зона, появляющаяся уже на первых стадиях нагружения и циклическая зона» [16].

При наличии сжимающих напряжений в вершине трещины и растягивающих напряжений перед ней образуется циклическая пластическая зона.

«В свою очередь монотонная пластическая зона связана с максимальным растягивающим напряжением действующими у вершины усталостной трещины» [16].

В целом, механизмы разрушения кристаллических материалов при циклическом нагружении сложны и многогранны, и на них может влиять широкий спектр факторов. Понимание этих механизмов необходимо для разработки материалов, устойчивых к разрушению при циклическом нагружении, и для обеспечения безопасности и надежности инженерных конструкций и компонентов.

### **2.3 Основные причины разрушения волноводов**

После обзора соответствующей научной литературы можно сделать вывод, что ультразвуковое вибрационное оборудование имеет многообещающее будущее во многих отраслях производства. Однако, как и другое оборудование, оно подвержено поломкам из-за различных факторов. Ниже приведены виды разрушений волноводов:

- усталостный излом происходит, когда волновод подвергается повторяющемуся напряжению с течением времени, что в конечном итоге приводит к образованию трещины. Этот тип разрушения вызван циклическим характером ультразвуковой сварки, когда волновод подвергается повторяющемуся напряжению и деформации во время каждого цикла сварки. Усталостные разрушения могут возникать из-за неправильного технического обслуживания, например, неадекватной очистки или смазки волновода.

- ударный излом происходит, когда волновод подвергается внезапному воздействию силы высокой интенсивности, например, при падении волновода или ударе по нему твердым предметом. Ударный излом также может произойти из-за неправильного обращения или установки волновода.
- излом при перегрузке происходит, когда волновод подвергается воздействию силы, превышающей его максимальную грузоподъемность. Это может произойти, если параметры сварки установлены слишком высоко или если свариваемые материалы слишком толстые или твердые для волновода.
- коррозионный излом происходит, когда волновод подвергается воздействию агрессивных веществ, таких как кислотные или щелочные растворы, которые могут ослабить материал волновода и привести к растрескиванию.
- термический усталостный излом происходит, когда волновод подвергается многократным циклам нагрева и охлаждения, что приводит к термическому напряжению и в конечном итоге к растрескиванию. Этот тип разрушения может произойти, если параметры сварки установлены неправильно, что приводит к перегреву волновода.

Чтобы предотвратить разрушение волновода во время ультразвуковой сварки, важно правильно обслуживать волновод, а также убедиться, что параметры сварки установлены правильно для свариваемых материалов. Регулярные осмотры и техническое обслуживание помогут обнаружить и предотвратить переломы до их возникновения.

Примечательно, что большинство компаний утилизируют волноводы после выхода их из строя, не исследуя основные причины отказов и не изучая методы их упрочнения. Это указывает на то, что существует проблема с изучением и пониманием причин механических повреждений волнопроводов. В следующих главах будет представлен анализ и выводы по разработке

технологии упрочнения волноводов из алюминиевого сплава Д16Т.

### 3 Разработка технологии упрочнения волноводов из алюминиевого сплава Д16Т

#### 3.1 Методика экспериментального исследования

Экспериментальное исследование проводили на токарном станке модели 16Б16Т1С1, оснащенном технологическим комплексом для упрочнения поверхностным пластическим деформированием (ППД) – выглаживанием с возможностью ультразвуковой обработки (рисунок 13). Обработку выглаживанием, как с ультразвуком, так и без, производили на волноводах после токарной обработки. Режим выглаживания: статическое усилие деформирования  $P$  изменяли от 50 до 250 Н; подача  $s$  составляла 0,07...0,15 мм/об; окружная скорость заготовки  $v = 35$  м/мин. Наложение ультразвуковых колебаний УЗК на инструмент осуществляли с амплитудой  $A = 5$  и 10 мкм и частотой  $f = 22$  кГц в направлении по нормали к обрабатываемой поверхности. В процессе исследования измеряли микротвердость поверхности, глубину упрочненного слоя. Фото процесса обработки представлено на рисунок 14.

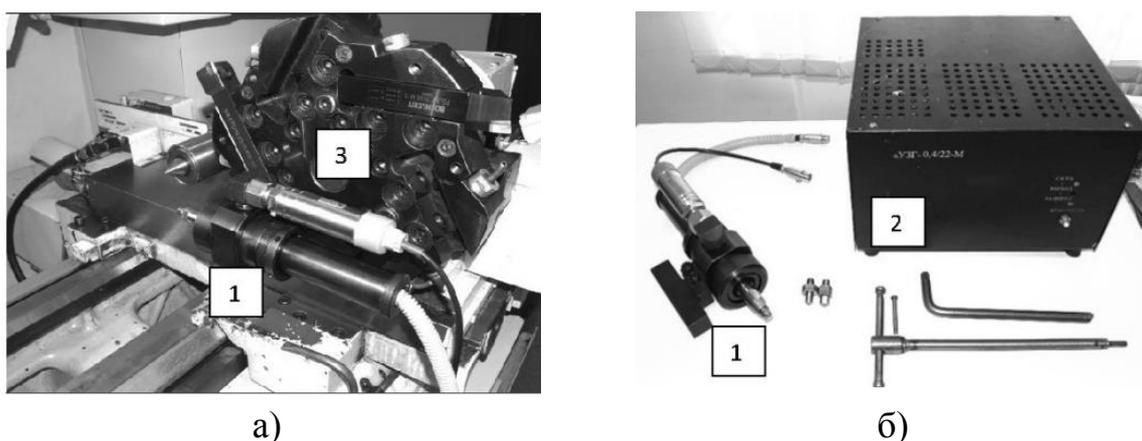
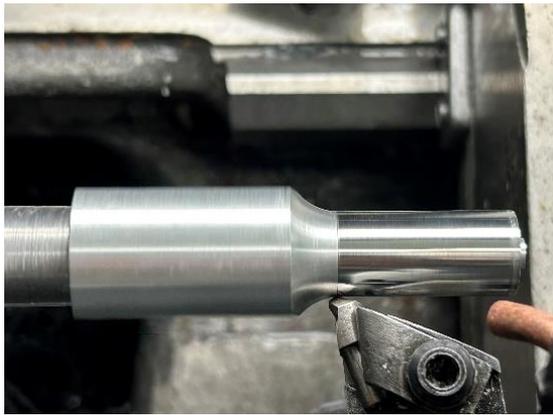


Рисунок 13 – Технологическое оснащение для выглаживания на токарных станках с ЧПУ: 1 – ультразвуковое устройство для выглаживания; 2 – ультразвуковой генератор; 3 – револьверная головка токарного станка с ЧПУ



а)



б)

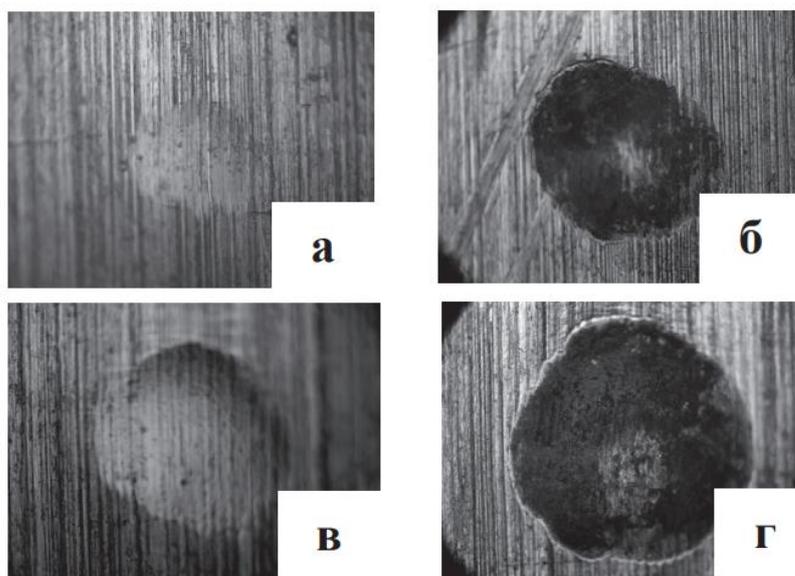
Рисунок 14 – Процесс обработки выглаживанием волноводов из алюминиевого сплава Д16Т: а) – обработка ступенчатой и б) цилиндрической поверхностей

С целью определения оптимальных режимов обработки проводили испытания по статическому внедрению индентора в заготовку без и с ультразвуком с последующим измерением диаметров отпечатков и расчетом степени пластической деформации. Измерение отпечатков проводили с помощью металлографического микроскопа ЛАБОМЕТ при увеличении в 100 раз.

Измерение микротвердости поверхности производили по стандартным методика в соответствии с ГОСТ 1913-59.

### **3.2 Результаты экспериментального исследования**

Факт увеличения степени пластической деформации под действием



энергии ультразвуковых колебаний инструмента иллюстрируется на рисунке 15. Как следует из рисунка 15, при равной статической силе внедрения, дополнительные колебания инструмента с ультразвуковой частотой существенно увеличивают размер отпечатка.

Рисунок 15 – Фотографии отпечатков на поверхности сплава Д16Т при статическом внедрении инструмента: а, в – внедрение без ультразвука; б, г – с ультразвуком. а, б – усилие 100 Н, в, г – 270Н. Увеличение x100.

В таблице 2 дана количественная оценка диаметров отпечатков и относительной степени пластической деформации, возникающей при внедрении инструмента в материал, рассчитанная по формуле:

$$\varepsilon = \sqrt{1 + \left(\frac{d}{R}\right)^2} - 1 \quad (1)$$

где  $d$  – диаметр пластического отпечатка, мм;  $R$  – радиус сферической части инструмента, мм

Применение энергии УЗК при статическом воздействии индентора на материал приводит к увеличению относительной деформации

поверхностного слоя, причем наибольшая разница (62,7 %) в исследуемом диапазоне наблюдается при малых (100 Н) значениях статических усилий. С увеличением статического усилия действия УЗК снижается.

Таблица 2 - количественная оценка диаметров отпечатков и относительной степени пластической деформации

Статическое усилие, Н	Диаметр отпечатка, мм	Относительная деформация, $\epsilon$	Прирост относительной деформации, %
100	0,55/0,9	0,006/0,0161	62,7%
180	0,8/1,15	0,0127/0,0261	51,3%
270	0,9/1,15	0,0161/0,0261	38,3%
В числителе указаны данные для обычного выглаживания, в знаменателе – для ультразвукового			

На рисунках 16 и 17 представлены результаты измерения микротвердости и глубины упрочнения поверхностного слоя выглаженных образцов при обычно и ультразвуковой обработке. С увеличением усилия обработки как твердость, так и глубина упрочнения исследуемых образцов увеличивается. Однако, при ультразвуковой обработке для достижения той же твердости, как и при обычном выглаживании требуется усилие в 1,5-2 раза меньше. Это позволяет эффективно обрабатывать образцы с наименьшими усилиями и снизить вероятность перенаклепа поверхностного слоя

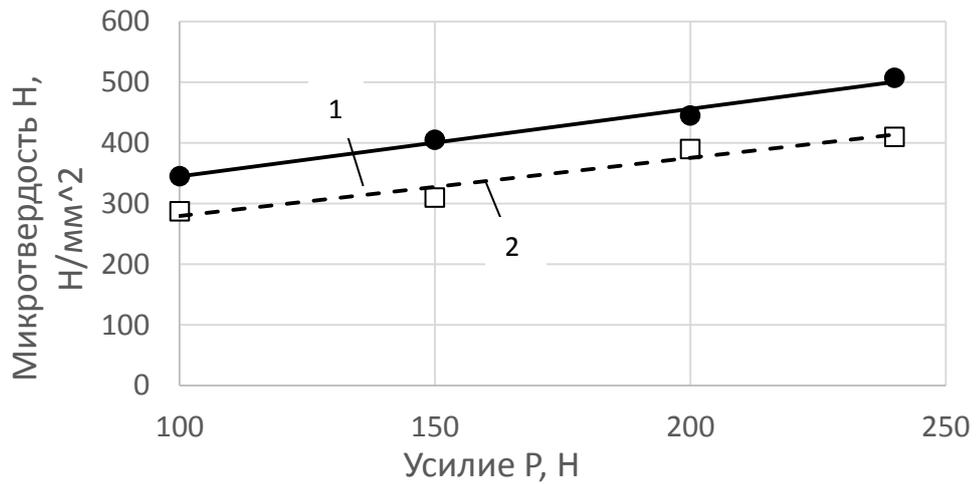


Рисунок 16 – Зависимость твёрдости от усилия выглаживания образцов из алюминиевого сплава Д16Т6 1 – обработка с ультразвуком; 2 – обработка без ультразвука

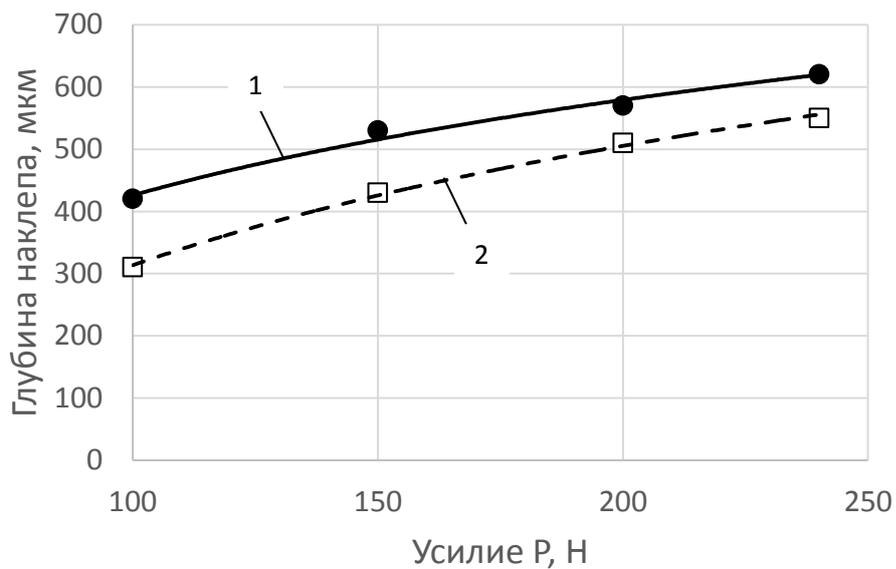


Рисунок 17 – Зависимость глубины упрочнения от усилия выглаживания образцов из алюминиевого сплава Д16Т6 1 – обработка с ультразвуком; 2 – обработка без ультразвука

Интересными представляются результаты исследования степени наклепа, выраженные в процентном соотношении прироста микротвёрдости (рисунок 18)

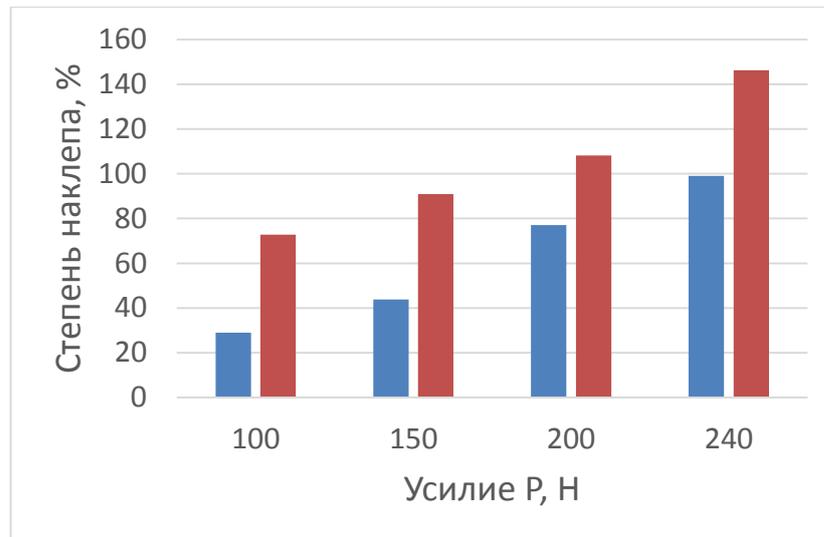


Рисунок 18 – Диаграмма степени наклепа образцов в процессе обычного и ультразвукового выглаживания: 1 – обработка без ультразвука; 2 – обработка с ультразвуком

Как следует из диаграммы степень наклепа при ультразвуковой обработки сравнительно выше, чем при обычном выглаживании. Но при этом более высокая интенсивность прироста твердости наблюдается при небольшом статическом усилии внедрения инструмента в обрабатываемую поверхность. Полученные данные коррелируют с результатами расчета относительной пластической деформации, когда максимальный ее прирост наблюдается при сравнительно не высоких значениях усилия обработки при ультразвуковом выглаживании. С технологической точки зрения это является важным условием при выборе оптимального усилия выглаживания, при котором с одной стороны необходимо достичь максимально возможное упрочнение поверхностного слоя, а с другой обеспечить сохранение геометрической формы изделия.

## **Заключение**

Выпускная работа посвящена разработке технологии упрочнения волноводов из алюминиевого сплава Д16Т.

В ходе анализа исходных данных исследованы волноводы и технологии с применением ультразвука и процессы проектирование ультразвуковых колебательных систем. Выполнено моделирование работы ультразвукового волновода в ANSYS, на основании которого получена эпюра напряжений в ультразвуковом волноводе. В результате установлено проблема циклической прочности волноводов.

Исследование путей решения проблемы позволило установить, что на механизм усталостного разрушения влияют несколько факторов, включая свойства материала, условия нагружения, условия окружающей среды и микроструктуру.

На основании анализа причин разрушения ультразвуковых волноводов в условиях практической эксплуатации установлено, что основными причинами разрушения являются усталостное разрушение. При этом характер разрушения носит определенные особенности, заключающиеся в

распространении усталостных трещин. На основании анализа локации разрушения и физических особенностей зарождения и развития трещин была предложена и исследована технология механического упрочнения методом ППД – выглаживанием, в том числе с применением ультразвуковых колебаний. Процесс упрочнения позволяет улучшить физитко-механические свойства волновода, а наложение в процесс обработки ультразвуковых колебаний позволяет обеспечить релаксацию механических остаточных напряжений в материале после предшествующей обработки.

Применяя эти требования на предприятиях в условиях массового производства, значительно увеличится долговечность ультразвуковых колебательных систем и волноводов, применяемых при различных ультразвуковых технологиях.

## Список используемой литературы

1. Аграната Б. А. Ультразвуковая технология. М., Металлургия, 1974. 504 с.
2. Балдев И. В., Радж, В. Раджендран, П. Паланичами Применения ультразвука. 2006. 576 с.
3. Баловнев Н. П. Расчет резьбовых соединений и винтовых механизмов 1999. 40 с.
4. Биргер И.А. Об одном критерии разрушения и пластичности. Механика твердого тела 1977. 240 с.
5. Ботвина Л. Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов. М: Наука, 1989. 230 с.
6. Владимиров В. И. Физическая природа разрушения материалов. М.: Металлургия, 1984. 280 с.
7. Иванова В. С., Шанявский А. А. Количественная фрактография.
8. Ильин А.А., Колачёв Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства, 2009. 520 с.
9. Клевцов Г. В., Лабораторный практикум по курсу «Материаловедение» для технических направлений подготовки бакалавров. Тольятти: ТГУ, 2015. 148 с.
10. Когаев В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени 1977. 232 с.
11. Коцаньда С. Усталостное разрушение металлов. М.: Металлургия, 2008.
12. Мороз Л. С. Механика и физика деформаций и разрушения материалов.Л.: Машиностроение, 1984. 224 с.
13. Сырников Е.П. Расчет резьбовых соединений. Методические указания по разделу курса «Детали машин». М.: МАМИ, 1979. 31 с.
14. Теумин И. Ультразвуковые колебательные системы, 1959. 332 с.

15. Физические основы ультразвуковой технологии. Под ред. Л. Д. Розенберга. М., Наука, 1970. 689 с.
16. Хажинский Г. М., Основы расчетов на усталость и длительную прочность 2016. 168 с.
17. Холопов Ю. В. Ультразвуковая сварка М., Машиностроение, 1972. 224 с.
18. Чечулин Б. Б. Титановые сплавы в машиностроении, 1977. 248 с.
19. Энгель Л., Клингел Г. Растровая электронная микроскопия. Разрушение: Справ. изд. М.: Металлургия, 1986. 232 с.
20. A.-S. Bonnet-Ben Dhia; B. Goursaud; C. Hazard; A. Prieto (2010) A multimodal method for non-uniform open waveguides [Text] Physics Procedia 3, 497-503.
21. S. Periyannan; P. Rajagopal; K. Balasubramaniam (2015) Robust Ultrasonic Waveguide Based Distributed Temperature Sensing [Text] Physics Procedia 70, 514-518.
22. Sudhakar Matle; S.Sundar (2014) Computation of transmission coefficients in the plain and corrugated electro-magnetic waveguides using finite point set method [Text] Applied Mathematical Modelling 38, 1838-1845
23. Yoon Young Kim; Young Eui Kwon (2015) Review of magnetostrictive patch transducers and applications in ultrasonic nondestructive testing of waveguides [Text] Ultrasonics 62, 3-19.
24. A. Ramkumar; A. Lal. (2012) Microscale ultrasonic sensors and actuators [Text] Woodhead Publishing 18, 572–618.