

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

Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра Нанотехнологии, материаловедение и механика
(наименование)

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 Анализ причин отказов ультразвуковых колебательных систем на базе магнитострикторов и волноводов из алюминиевого сплава Д16Т

Обучающийся

В.В. Еник

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

канд. техн. наук, А.С. Селиванов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2022

Аннотация

Эта дипломная работа посвящена анализу причин отказов ультразвуковых колебательных систем на базе магнитострикционных преобразователей и волноводов различной конструкции из алюминиевого сплава Д16Т.

Изначально во введении будет изложена актуальность, цель, обоснование и задачи данной работы.

Объектом исследования является алюминиевые сплавы. В данном исследовании были проведены испытания на разрыв, а также проведен фрактографический анализ трещин. В этой работе исследовался материал с одинаковым химическим составом и различной структурой.

В первом разделе проведён аналитический обзор литературных источников по данной теме, где были рассмотрены работы по проектированию и методам расчета волноводов, рассмотрены работы посвященные резьбовым соединениям, за счёт которых эти волноводы и присоединяются, а также литература по определению механическим свойствам алюминиевых сплавов и механизмы разрушения ультразвуковых волноводов из алюминиевых сплавов.

Во втором разделе показаны алюминиевые сплавы в качестве объекта исследования, а также методики их исследования. Указаны методы, инструменты и программное обеспечение, которые были использованы для получения результатов.

Третий раздел посвящен выводам и результатам исследования. Выводы и результаты делаются на основе полученных данных по каждому исследуемому объекту, в зависимости от чего и почему происходит разрушение образцов. Построена математическая модель ультразвуковых волноводов и сделан подробный анализ причин разрушения на основе этой модели.

Abstract

The present graduation work is devoted to analyzing the causes of ultrasonic oscillating system failures based on magnetostrictors and waveguides made of D16T aluminium alloy.

The introduction explains in detail the relevance of the research, its purposes and objectives.

The object of the graduation work is the aluminium alloys. The research deals with fracturing the parts by using special equipment. The fractographic analysis of the fractured samples cracks is also conducted. The research considers the two waveguides of this brand where the cracks have been detected.

The first chapter of the investigation presents an analytical review of various sources, including those ones devoted to waveguides and threaded joints used to fasten these waveguides. This chapter also examines the sources devoted to determining the mechanical properties of the aluminium alloys as well as the existing types and the fracture mechanisms of the ultrasonic waveguides made of aluminium alloys.

The second chapter of the research covers the material study methodology. The necessary methods, tools, equipment and software for obtaining the desired results are described as well.

The third chapter of the research discusses the results obtained. These results are presented in the form of comparison and show the types and the fracture mechanism of the wrought and cast aluminum alloys. The necessary graphs and the inner stress diagrams of ultrasonic waveguides are also constructed in this chapter. The analysis of the fracture causes based on the collected data is carried out as well.

Содержание

Введение.....	5
1 Литературный обзор	7
1.2 Технологии с применением ультразвука	8
1.3 Волноводы	10
1.4 Проектирование ультразвуковых колебательных систем	12
1.5 Методика расчёта волноводов	13
1.6 Резьбовые соединения и нагрузки.....	14
1.7 Разрушение твёрдых тел во время действия циклических нагрузок.....	17
1.8 Механизмы разрушения твёрдых тел при циклических нагрузках	20
1.9 Разрушение волноводов	22
2. Материал и методики исследования	23
2.1 Материал изделия.....	23
2.2 Подготовка образцов к экспериментам	24
2.3 Методики проведения испытаний на растяжение	25
2.4 Методики исследования структуры сплавов.....	27
2.5 Методики макро – и микрофрактографических исследований.....	27
2.6 Методики исследования математической модели.....	28
3. Результаты исследования и их обсуждения	31
3.1 Анализ структуры сплава Д16Т-1	31
3.2 Анализ структуры сплава Д16Т-2	34
Заключение	38
Список используемой литературы	39

Введение

Одной из актуальных проблем современной промышленности является, как создание новых, уникальных, так и модернизация уже существующих технологий производства. Для достижения модернизации большого количества технологических процессов одну из ведущих ролей играет применение технологий, действие которых основано на использовании ультразвуковых колебаний. Ультразвуковые технологии применяются во многих сферах жизнедеятельности человека, поэтому основные процессы, На сегодняшний день основные процессы, реализуемые и интенсифицируемые при помощи высокоэнергетических ультразвуковых колебаний, принято разделять на три группы, в зависимости от вида среды, в которой они реализуются.

К первой группе относят все процессы, в которых в качестве обрабатываемой среды выступают твердые и термопластичные материалы. К процессам в данной группе относится УЗ сварка. В настоящее время с помощью ультразвуковых колебаний высокой интенсивности производится сварка полимерных термопластичных материалов. Сварка полиэтиленовых тубиков, коробок, банок обеспечивает отличную герметичность. В отличие от других способов, с помощью ультразвука можно варить загрязненные пластмассы, трубки с жидкостью. При этом содержимое стерилизуется. С помощью ультразвуковой сварки производится сварка тончайшей фольги или проволоки к металлической детали. Причем УЗ сварка является холодной сваркой, поскольку шов формируется при температуре ниже температуры плавления. Таким образом, соединяются сваркой алюминий, тантал, цирконий, ниобий, молибден.

Ко второй группе – процессы, связанные с обработкой жидких сред. Например, ультразвуковая очистка. Сегодня существует множество способов очистки поверхностей от различных загрязнений. УЗ очистка является наиболее быстрой, она обеспечивает высокое качество и отмывает

труднодоступные участки. При этом обеспечивается замена высокотоксичных, огнеопасных и дорогих растворителей обычной водой. С помощью высокочастотных ультразвуковых колебаний производится очистка автомобильных карбюраторов и инжекторов за несколько минут. Причина ускорения очистки в кавитации, особом явлении, при котором в жидкости образуются мельчайшие газовые пузырьки, создают мощные гидротоки, которые вымывают всю грязь. На этом принципе существуют сегодня стиральные машины и малые установки мойки. Ультразвуковое воздействие в жидких средах уничтожает микроорганизмы и поэтому широко используется в медицине и микробиологии. Третья группа – это интенсификация процессов в газовых средах. Известно, что металлы при плавлении поглощают газы алюминия и его сплавы. Это приводит к ухудшению качеств металла. Газы удается удалять с помощью УЗ, что позволило в нашей стране создать специальный технологический цикл и широко использовать его при производстве металлов. Для определенных видов работ и задач требуется использование специальной ультразвуковой техники, которая в свою очередь может требовать использования сложных форм волноводов, проектирование которых является непростой задачей и требует достаточно времени. Чем выше требования у технологического задания, тем выше сложность и себестоимость волновода.

Цель работы – изучить причины, механизмы отказа ультразвуковых колебательных систем на базе магнитострикторов с учётом выбранного материала.

Задачи:

- литературный обзор на данную тематику;
- описание методик, оборудования и исследуемых объектов;
- анализ полученных результатов и получение информации касательно причин выхода из строя волноводов.

1 Литературный обзор

1.1 Алюминиевый сплав Д16Т

Алюминиевый сплав Д16Т относится к системе Al - Cu - Mg.

В первую очередь Д16Т подвергается закалке при температуре 495-505 градусов.

Во-вторых, дюралюминий закаливается в холодной воде, больше влияние имеет именно температура охлаждающей среды, где самый оптимальный диапазон, при котором сплав достигает максимального сопротивления к межкристаллитной коррозии и питингу – 250-350 градусов.

И в последнюю очередь дюралюминиевый сплав Д16Т подвергается естественному старению, которое проводится при комнатной температуре в течение 4-5 дней.

В результате после закалки и старения материал приобретает твердость, равную 125-130 НВ, которая является максимальной среди всех известных дюралюминов.

На рисунке 1 представлен химический состав в % материала Д16Т. На рисунке 2 представлены достоинства материала Д16Т.

Fe	Si	Mn	Cr	Al	Cu	Mg	Zn	Примеси
До 0.5	До 0.5	0.3-0.9	До 0.1	90.9-94.7	3.8-4.9	1.2-1.8	До 0.25	Прочие, всего 0.15

Рисунок 1 – Химический состав Д16Т

Достоинства

Механическая прочность в результате термовпрочения
Малый удельный вес
Гибкость и пластичность
Повышенное сопротивление микроскопической деформации в процессе эксплуатации
низкая химическая активность

Рисунок 2 – Достоинства материала Д16Т

Области применения:

Благодаря уникальным эксплуатационным характеристикам сплав Д16Т применяется в различных отраслях народного хозяйства. Главным образом, Д16Т используется в нефтяной, химической, судостроительной, автомобилестроительной и авиаконструкторской промышленности. Плиты и листы из алюминиевого сплава применяются в сборке кузовов, обшивок, тяг, лонжеронов и каркасов автомобилей, судов, авиационной и космической техники, а также для изготовления рекламных щитов, уличных табличек и дорожных знаков. Кроме того, ни один современный производственный станок, не обходится без деталей из дюрала. Материал отлично себя зарекомендовал себя и в нефтедобывающей промышленности. Таким образом из Д16Т производятся трубы нефтяной нормали, подобное оборудование из дюрала может служить бесперебойно, а главное, стабильно и безотказно порядка восьми лет. Если затрагивать сферу ультразвуковых технологий, то из Д16Т изготавливаются волноводы различной сложности.

1.2 Технологии с применением ультразвука

На данный момент существует огромное множество способов сварки полимерных материалов, такие как: клеевой, тепловой или с помощью тока

высокой частоты. Каждый из всех этих методов имеет недостатки, которые влияют на возможность провести обработку.

«Более перспективным способом решения проблемы с соединением полимерных материалов является ультразвуковой способ, который может обеспечить прочный, долговечный и эластичный шов, высокую производительность процесса, его безопасность и возможность его автоматизировать. На данный момент ультразвуковая сварка является одним из самых эффективных способов сварки полимерных материалов. Без ультразвука дальнейшее совершенствование технологии соединения таких полимеров, как полистирол, полиэтилентерефталат, полиметилметакрилат и другие попросту невозможно» [1,2].

«Исходя из анализа технических возможностей ультразвуковой сварки, можно выявить самые основные преимущества данной технологии:

- получение надёжного шва при температуре, ниже температуры плавления материала,
- повышение качества герметизирующего шва, за счёт увеличения диффузионного взаимопроникновения свариваемых материалов,
- снижение сварочного усилия до значений, которые значительно меньше, чем предел текучести свариваемого материала» [1,2],
- сварка материалов, которые на своей поверхности имеют жировые и жидкие плёнки, а также различного рода загрязнения,
- полностью исключён перегрев материала по толщине, так как максимальный нагрев происходит только на соединяемых поверхностях.

Колебания в процессе сварки совершаются в диапазоне свыше 20 кГц и амплитудой на уровне 100 мкм.

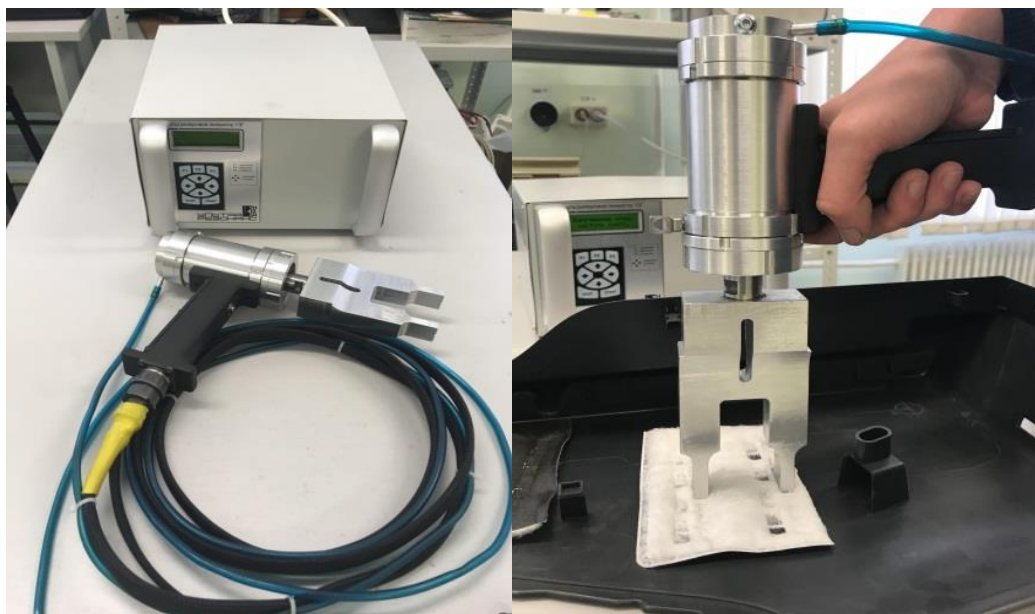


Рисунок 3 – Процесс ультразвуковой сварки

1.3 Волноводы

Волновод – это специальный канал (искусственный или естественный), который может распространять волны и способный поддерживать их частоту.

Одно из набирающих обороты направлений использования волноводов является ультразвуковая сварка, которая позволяет с помощью специальной установки на базе магнестриктора проводить сваривание изделий из пластмассы и полимеров.

На базе Тольяттинского Государственного Университета в лабораториях ведется работа по изучению различных волноводов, которые отличаются друг от друга не только формой и материалами, но и областями их применения.

Ниже, на рисунке 4 представлен вид ультразвуковой колебательной системы.

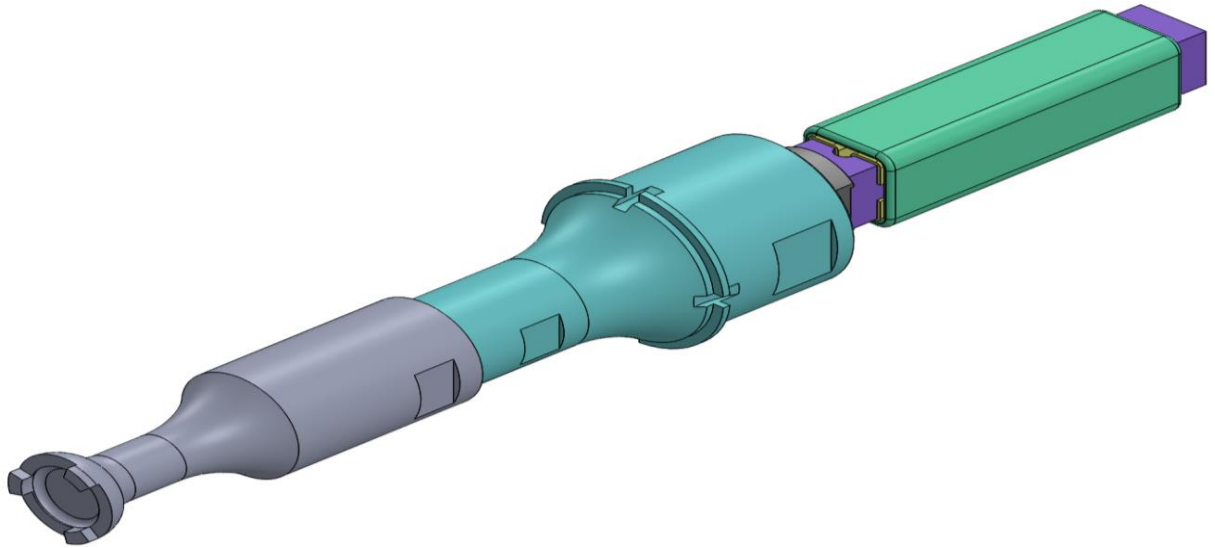


Рисунок 4 – Общий вид ультразвуковой колебательной системы

Вся УЗКС состоит из нескольких частей: магнитоотриктор на котором находится обмотка подмагничивания, специальный переходник, который имеет стандартную длину в 10 мм, и сам волновод или же бустер. Бустер в свою очередь это амплитудный преобразователь. Он представляет ключевой элемент резонансной структуры. Служит для увеличения или снижения амплитуды колебаний преобразователя и передаёт их волноводу. Сама амплитуда меняется в зависимости от характеристик заготовки. На рисунках 5 и 6 представлены волноводы из алюминиевого сплава Д16Т.



Рисунок 5 – волновод из алюминиевого сплава Д16Т



Рисунок 6 – Волновод из алюминиевого сплава Д16Т

Материалы, из которых изготавливаются волноводы довольно разные, но наиболее известны те, которые изготавливаются из алюминиевых и титановых сплавов. Каждый из материалов по-своему хорош, но каждый из них имеет плюсы по сравнению с другим в отдельных моментах.

1.4 Проектирование ультразвуковых колебательных систем

Проектирование УЗКС с использованием эмпирических формул с применением данных, полученных экспериментальным путём довольно затруднительный и долгий процесс. С учётом этого, чтобы проверить правильность расчётов можно только изготовив рассчитанную колебательную систему.

Сам процесс создания и проектирования разбит на несколько частей:

- по известным методикам проводится предварительный расчёт,
- моделирование,
- процесс реализации рассчитанной конструкции,
- измерение параметров полученной УЗКС,

- финальный расчёт и поправки на основе полученных экспериментальных данных.

Первым делом разработка осуществляется с помощью программы AutoCAD, после чего на этапе моделирования используется программа ANSYS. На рисунке 7 показан конечный результат моделирования при использовании программы ANSYS.

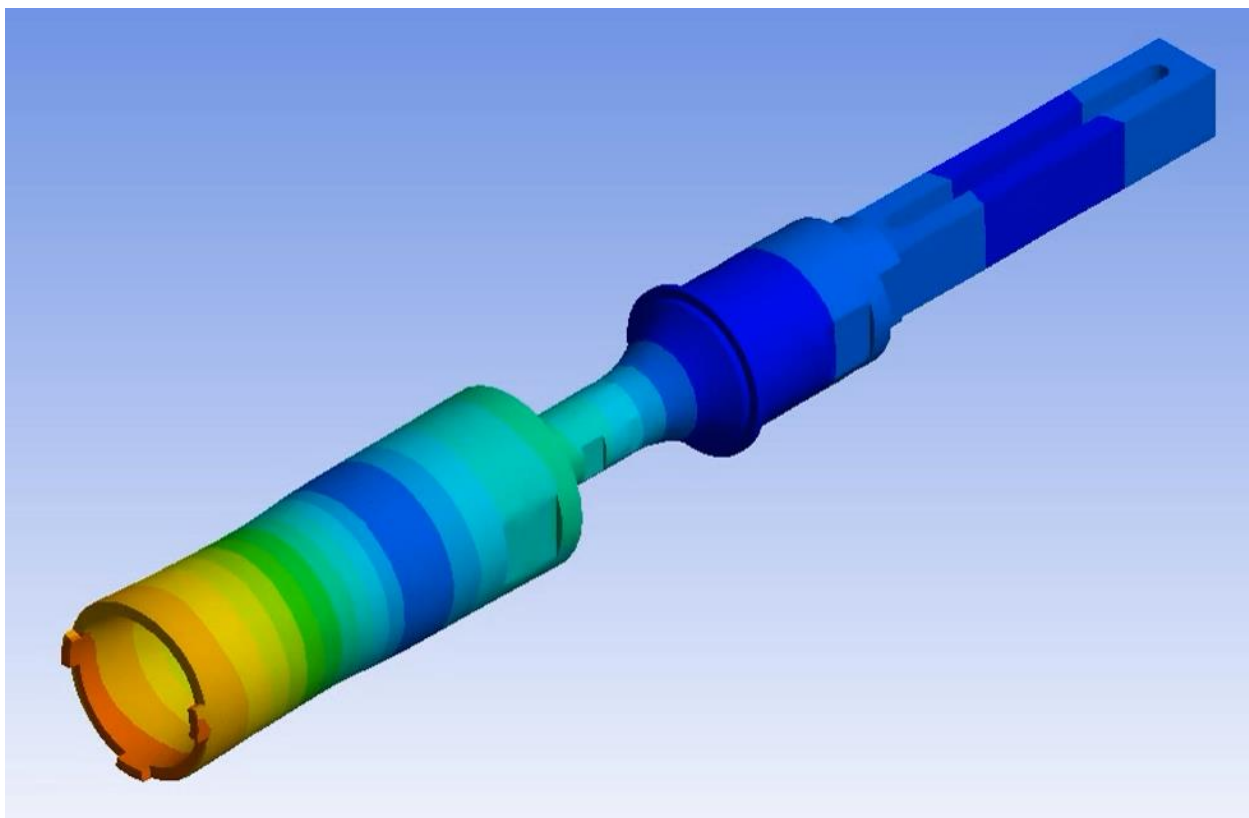


Рисунок 7 – Построенная модель ультразвуковой колебательной системы с применением волновода на базе Д16Т

1.5 Методика расчёта волноводов

В основу расчёта положено волновое уравнение:

$$\rho F \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E \frac{\partial}{\partial x} \left(F \frac{\partial u}{\partial x} \right), \quad (1)$$

где F – площадь поперечного сечения волновода;

ρ – модуль упругости и плотность материала;

u – волна смещения вдоль оси x .

Обычно данное уравнение решается при условии, что волновод свободен на концах. Что говорит о том, что на его концах отсутствует динамическая сила, то есть деформация. $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$ при $x = 0$ и $x = l_p$, где l_p – резонансная длина» [1].

Следует сказать, что условие данного уравнения не является строго справедливым при ультразвуковой сварке, так как свариваемые детали представляют собой некоторую нагрузку, которая приложена к торцу волновода. Учесть подобное обстоятельство крайне сложно, так как нагрузка зависит от статического давления и меняется непосредственно в процессе сварки при изменении температуры.

1. 6 Резьбовые соединения и нагрузки

Как известно, все резьбовые соединения работают с предварительной затяжкой, из-за которой переменная внешняя нагрузка передаётся на резьбовую деталь. Деталь в тот момент, когда соединение затянуто, имеет большую прочность, чем в момент, когда она не затянута.

Резьбовыми называются разъёмные соединения, которые выполняются с резьбовыми крепёжными деталями.

Существует два вида резьб, отличающихся по форме поверхности, это конические и цилиндрические. По назначению резьбы бывают нескольких видов:

- крепёжные резьбы – которые соответственно служат для скрепления между собой деталей, по большей части они имеют треугольный профиль;

- крепёжно – уплотняющие резьбы – также, как и просто крепежные используются для скрепления деталей, так и для герметизации соединений;

- резьбы грузовых и ходовых винтов – имеют трапецеидальный и упорный профиль, что обеспечивает уменьшение трение в резьбе, повышая КПД винтовых механизмов.

Среди имеющихся, большее распространение получили винты, которые имеют головку с наружным шестигранником. Применяются два вида винтов, те, которые имеют головку с шестигранником и те, которые сделаны со шлицем, позволяющим использовать либо обычную, либо крестообразную отвёртку.

Для того чтобы винты не могли самоотвинчиваться, используют так называемые специальные устройства и методы:

- стопорные устройства – шплинты, стопорные гайки, штифты. Одни из самых дорогих и сложных по конструкции деталей, которые применяются в ответственных соединениях;

- разрезные гайки, контргайки – это те устройства, которые используют для создания дополнительной силы трения между крепёжными и соединяемыми деталями. Они довольно простые по конструкции, допускают бесступенчатую затяжку и используются в основном для не сильно нагруженных соединений;

- метод ввинчивания крепёжной детали в отверстие, которое не имеет резьбы. Используется во время установки шпилек в детали, изготовленных из цветных сплавов. В свою очередь специальные шпильки, которые имеют заходную часть, могут применяться и в металлических деталях;

- метод, при котором для стопорения гайки используется сварка, склеивание, пайка и накернивание. Такой метод зачастую используется в тех случаях, когда соединение не собираются подвергать разборке.

«Для лучшей работы резьбовых соединений при их установке прикладывают силу затяжки. Прочность затянутого резьбового соединения при непостоянных нагрузках выше, чем незатянутого, потому что в затянутом состоянии даже в условиях разности температур резьбовые соединения будут в сцеплении, но, если затяжки не будет есть шанс что при неравномерном нагревании в резьбовом соединении возникнет зазор что может повлиять на разрушение болта либо выход болта за пределы рабочей зоны.

На границах стыка соединяемых деталей затяжка создает давление, которое в свою очередь прижимает болт к объекту, отчего повышается плотность стыка. Кроме силы затяжки, на резьбовые соединения при работе воздействуют как напряжения сжатия, так и растяжения, а также дополнительные силы.

Напряжения растяжения, а также сжатия связаны и их, как правило, можно определить расчетным путем или экспериментально» [16,18].

В большинстве случаев, затяжка образует определённое минимальное давление на стыке соединяемых деталей, обеспечивая необходимую плотность стыка.

Так же на резьбовую деталь может быть оказано действие растягивающих нагрузок, которые возникают из-за температурных деформаций детали.

«Разрушения резьбовых соединений, особенно при переменных нагрузках, часто связаны со значительной концентрацией напряжений во впадинах резьбы из-за неравномерного распределения нагрузки между витками и высокой местной напряженности» [16,19]

На резьбовом соединении нагрузки распределяются согласно модели Жуковского Н.Е (рисунок 8).

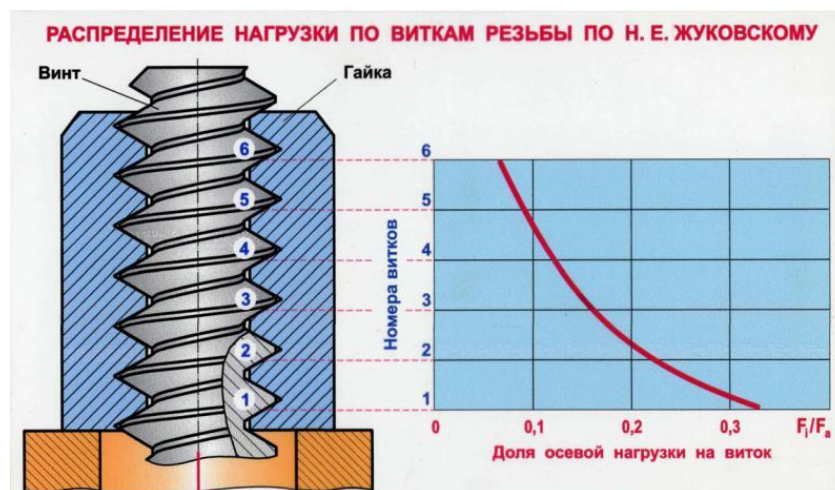


Рисунок 8 – Модель распределения нагрузки в резьбовом соединении

На данной модели можно увидеть, что в первую очередь нагрузка идёт на первую впадину витка резьбы и с последующим ходом нагрузка уменьшается. В связи с этим наблюдением, можно заметить, что в зависимости от увеличения числа витков в резьбе незначительно увеличиваются прочностные свойства.

1.7 Разрушение твёрдых тел во время действия циклических нагрузок

Разрушение, которое происходит под воздействием циклических нагрузок на металлические материалы, отличается от воздействия однократных нагрузок.

«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» [21–23].

«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» [23].

«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» [21–23].

«При дальнейшем росте усталостных микротрещин в области нескольких зёрен начинается стадия роста усталостной макротрещины» [22]. 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.

«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» [23].

Можно отметить, отличительны 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.

«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» [23].

«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» [23].

1.8 Механизмы разрушения твёрдых тел при циклических нагрузках

Процесс разрушения металлических материалов при циклических нагрузках не похож на разрушение, достигнутое путём однократных нагрузок.

«Усталостное разрушение происходит при напряжениях, меньших предела прочности при условии постоянной 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» [18].

«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» [19,21].

«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» [20]

«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» [20].

«Трещины продвигаются вперед на определенное 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» [20].

«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 [18]. 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» [22–24].

«Можно отметить, отличительны 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». [22]

Если в вершине распространяющейся трещины возникают значительные по величине напряжения сжатия и при это впереди трещины есть растягивающие напряжения образуется циклическая пластическая зона. «В свою очередь монотонная пластическая зона связана с максимальным растягивающими напряжением действующими у вершины усталостной трещины» [23].

1.9 Разрушение волноводов

Исходя из всей предложенной выше информации, можно отметить то, что ультразвуковые колебательные системы имеют большое будущее в большинстве сфер производства, но, несмотря на это, как и любое другое оборудование имеет свойство разрушаться за счёт различных факторов, таких как:

- конструкционные дефекты;
- дефекты материала;
- напряжения в резьбовом соединении.

Как известно, большинство предприятий после выхода из строя волноводов, просто утилизируют их, не занимаясь вопросами причин их отказов. Из этого можно сделать вывод, что существует проблема, связанная с анализом ультразвуковых колебательных систем и их составляющих (волноводов) с целью установления причин их разрушения и поиском возможного решения проблемы. Именно этой проблеме и будет посвящён второй (практический) раздел нашей работы.

2. Материал и методики исследования

2.1 Материал изделия

В качестве материала ультразвуковых волноводов был использован титановый сплав Д16Т (90,9-94,7 % Al; до 3,8-4,9 % Cu; 1,2-1,8 % Mg; 0,3-0,9 % Mn; до 0,5 % Fe; до 0,5 % Si; 0,25 % Zn; до 0,15 % Ti) в деформированном и литом состояниях.

Выбор образцов для испытаний (рисунок 9).



Рисунок 9 – Предложенные волноводы

Первоначально из общего списка предложенных волноводов мы выбрали несколько образцов из сплава Д16Т (рисунок 10).



Рисунок 10 – Выбранные образцы из сплава Д16Т

2.2 Подготовка образцов к экспериментам

Далее каждый образец подвергался обработке для того, чтобы его смогли поместить в испытательную машину для исследований, такой обработанный волновод представлен на рисунке 11.



Рисунок 11 – Волновод после механической обработки

2.3 Методики проведения испытаний на растяжение

Испытания материалов и изделий на усталость и трещиностойкость проводились при помощи универсальной сервогидравлической испытательной машины Instron 8802 (рисунок 12).



Рисунок 12 – Универсальной сервогидравлической испытательной машины Instron 8802

Ниже, на рисунках 13-14 представлены примеры, получившиеся образцов после проведения испытаний на растяжение.



Рисунок 13 – Образец после испытаний на разрыв



Рисунок 14 – Образец после испытаний на разрыв

2.4 Методики исследования структуры сплавов

Структуру сплава изучали с помощью металлографический микроскоп Axio Vert 40 MAT (рисунок 15).



Рисунок 15 – Металлографический микроскоп Axio Vert 40 MAT

Данный инвертированный металлографический микроскоп благодаря тому, что его объективы находятся под предметным столиком, позволяет не ограничивать габариты исследуемого образца. Так же, данная модель обладает широкой функциональностью и соответствует самым новейшим требованиям в сфере материаловедческих исследований.

2.5 Методики макро – и микрофрактографических исследований

Макро-фрактографические исследования изломов проводили визуально; микро-фрактографические исследования в растровом электронном микроскопе (РЭМ) SIGMA фирмы «ZEISS» (рисунок 16).



Рисунок 16 – Сканирующий электронный микроскоп Sigma

2.6 Методики исследования математической модели

Исследование математической модели проводили с помощью программ Mathcad и КОМПАС – 3D.

В результате всех математических и графических вычислений и построений, мы получили наглядное представление о том, как данные образцы выглядят на чертеже, отметили места в которых произошло образование трещины и в результате чего построили эпюры напряжений,

которые указывают нам на место, в котором концентрация напряжений была больше всего (рисунок 17).

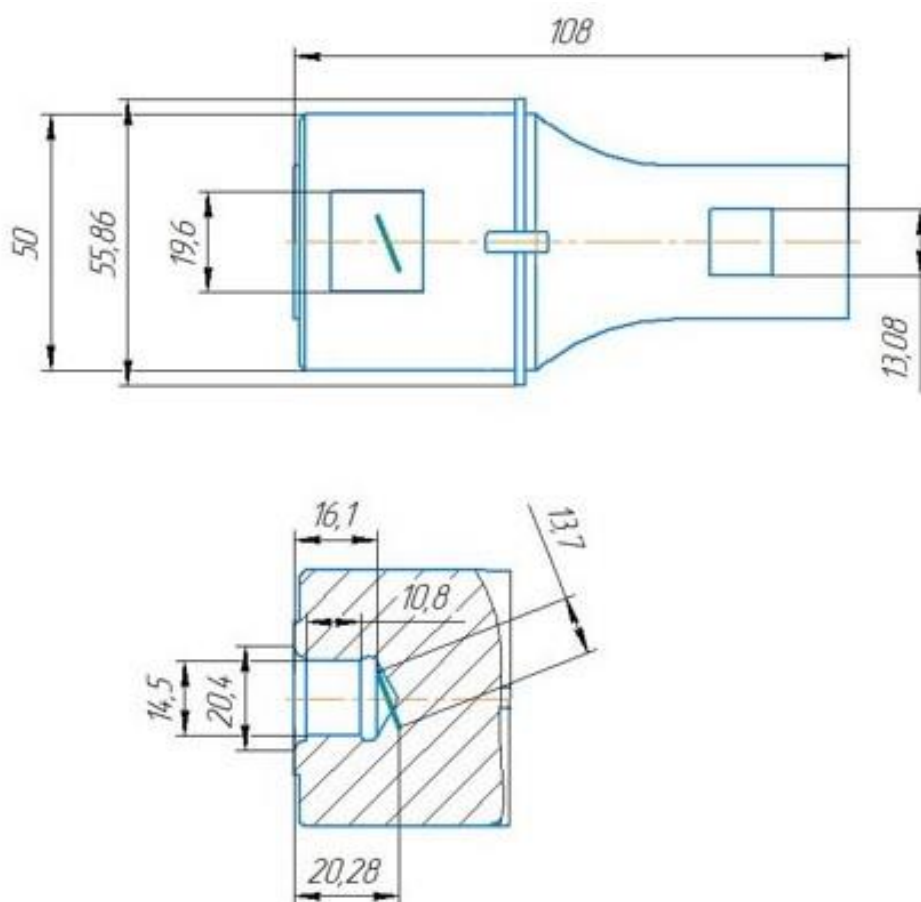


Рисунок 17 – Чертеж образца с указанием резьбового соединения

С помощью чертежа мы наглядно понимаем, какой размер имеет резьба, сам волновод и расстояние от торца самой трещины (трещина указана жирной полосой на общем виде).

Далее с помощью программы Mathcad по методике Баловнёва Н.П. были посчитаны и построены эпюры внутреннего напряжения (рисунок 18)

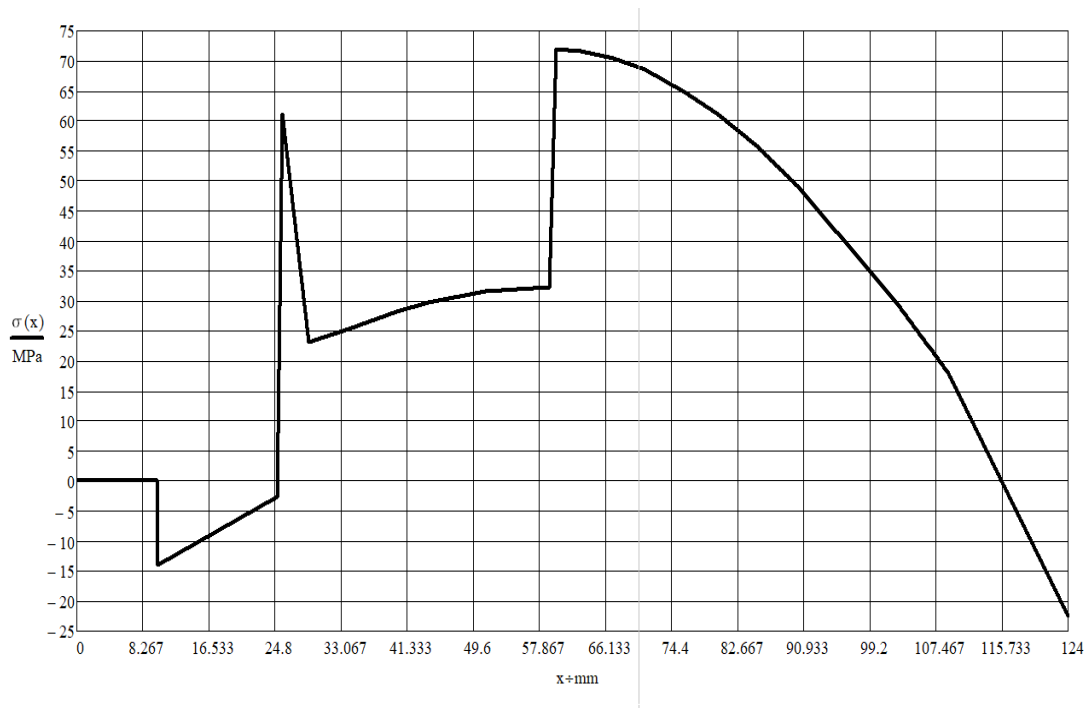


Рисунок 18 – Эпюра внутренних напряжений в волноводе

Как нам известно, волновод подсоединён к магнитостриктору с помощью 10 мм переходника, который также указан на графике (прямая линия от 0 до 10), далее идёт эпюра напряжений конкретно для волновода (от 10 до 124), в одном месте которой, мы видим два резких скачка напряжений, который исходя из чертежа приходится на местонахождения концентраторов в ступенчатом волноводе, а именно резьбовое соединение и переход на тонкостенную конструкцию.

3. Результаты исследования и их обсуждения

3.1 Анализ структуры сплава Д16Т-1

Общий вид волновода 1 с трещиной представлен на рисунке 19. После вскрытия трещины обнаружен излом, состоящий из нескольких отдельных фрагментах усталостного разрушения (рисунок 20).

Причем данные фрагменты расположены на разном уровне, а очаг зарождения трещины находится не только на поверхности волновода (у резьбы), но и внутри волновода (рисунок 21).



Рисунок 19 – Общий вид волновода 1



Рисунок 20 – Общий вид излома волновода 1 слева. Красными стрелками показаны направление распространения усталостной трещины в некоторых фрагментах усталостного разрушения



Рисунок 21 – Общий вид излома волновода 1 справа

Последнее имеет особый интерес, так как зарождение усталостной трещины внутри образца или детали имеет место при мегацикловой усталости. Поэтому усталостное разрушение волноводов под действием ультразвуковых колебаний можно рассматривать как мегацикловую усталость. Зарождение трещины при мегацикловой усталости происходит у дефектов металла (микропоры, неметаллические включения и так далее).

Отсюда следует вывод: к металлу, из которого изготавливают ультразвуковые волноводы должны быть предъявлены повышенные требования к качеству и чистоте металла.

Микрорельеф поверхности усталостных участков излома между макрополосами (рисунок 22) состоит из сравнительно малорельефных участков и бороздок, в основном расположенных параллельно направлению расположения усталостной трещины. Это вызывает сомнение, что они отражают положение фронта трещины за каждый цикл нагружения.

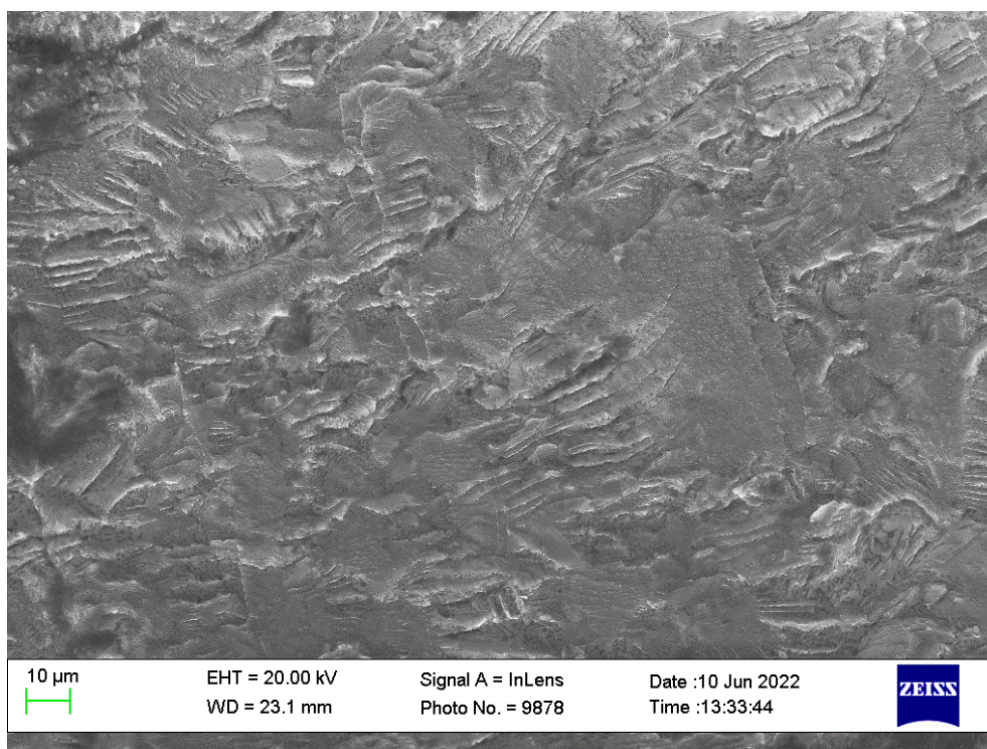


Рисунок 22 – Микрорельеф поверхности излома в средней части усталостной зоны. Направление распространения трещины слева на право. x500

Обнаружен необычный микрорельеф поверхности усталостных изломов волноводов из алюминиевого сплава Д16Т (волновод №1), состоящий из полос, напоминающих усталостные бороздки, расположенных параллельно фронту распространения усталостной трещины. Между такими полосами и перпендикулярно к ним располагаются мелкие бороздки. Природу формирования такого микрорельефа еще предстоит выяснить.

3.2 Анализ структуры сплава Д16Т-2

Общий вид волновода 2 с обнаруженной трещиной представлен на рисунке 23. Участок с трещиной выделен синим цветом. После вскрытия трещины можно наблюдать излом. Как видно из рисунка 23, излом является усталостным. Очаг зарождения усталостной трещины находится под поверхностью волновода, о чем свидетельствуют концентрические макрополосы на поверхности излома. Направление распространения усталостной трещины показано красной стрелкой (рисунок 24).



Рисунок 23 – Общий вид волновода 2 с трещиной

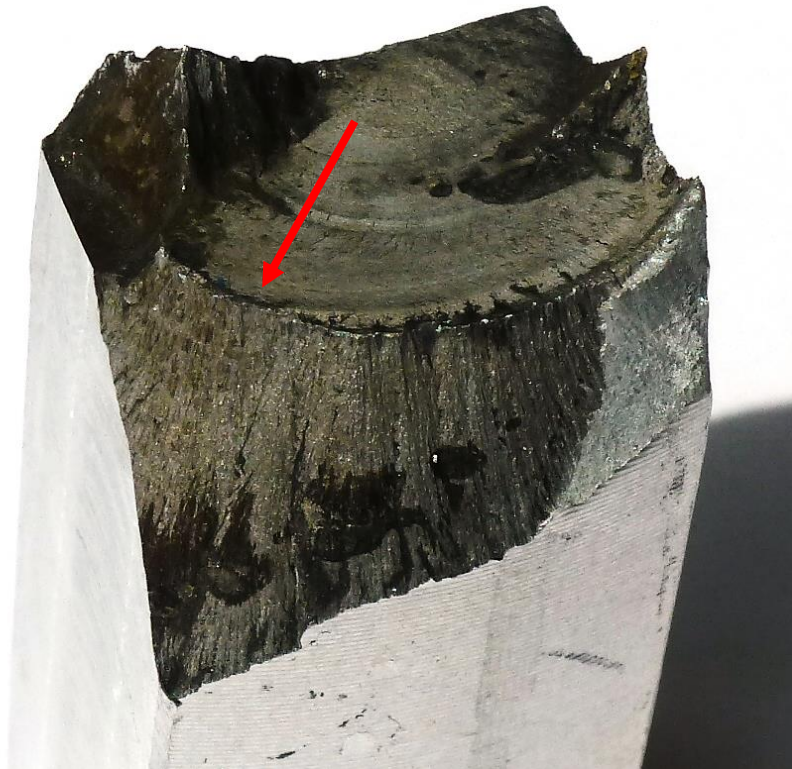


Рисунок 24 – Общий вид фрагмента излома волновода из сплава Д16Т

Вблизи очага зарождения усталостной трещины имеет место своеобразный микрорельеф, состоящий из полос, напоминающих усталостные бороздки, расположенных параллельно фронту распространения усталостной трещины. Между такими полосами и перпендикулярно к ним располагаются мелкие бороздки.

При большом увеличении видно, что мелкие бороздки иногда прерываются на вышеуказанных полосах; а иногда пересекают их. При дальнейшем распространении усталостной трещины (в зоне ускоренного развития трещины), помимо вышерассмотренного микрорельефа, видны участки с более гладким микрорельефом, на которых видны более мелкие усталостные бороздки (рисунки 25-27).

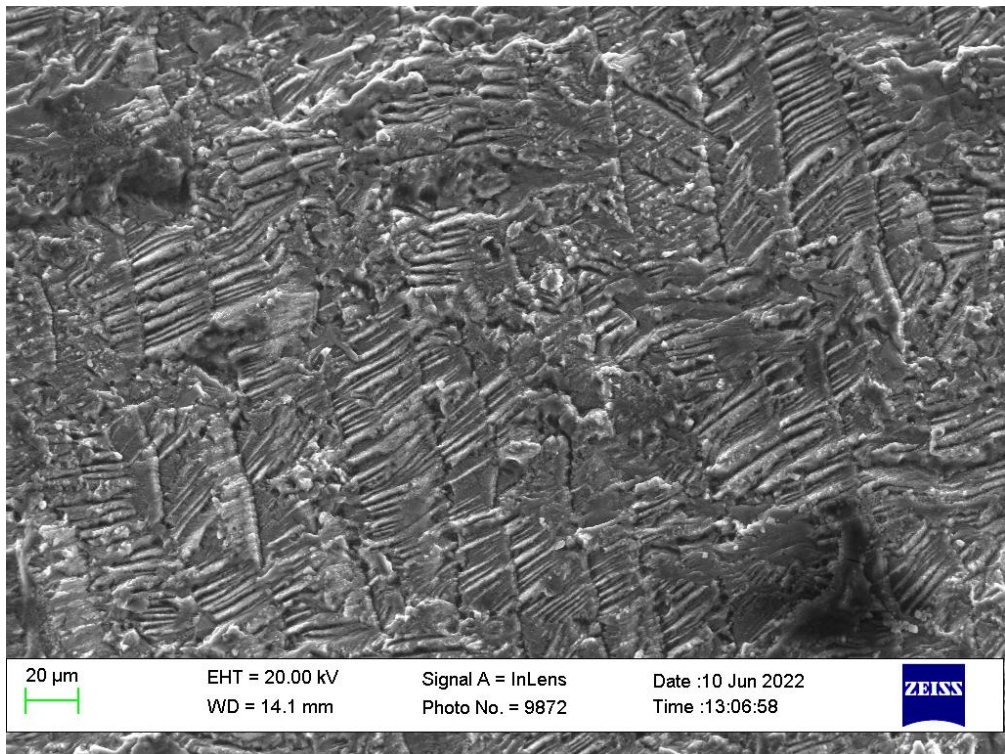


Рисунок 25 – Микрорельеф поверхности излома вблизи очага разрушения.
Направление распространения трещины слева на право. x300

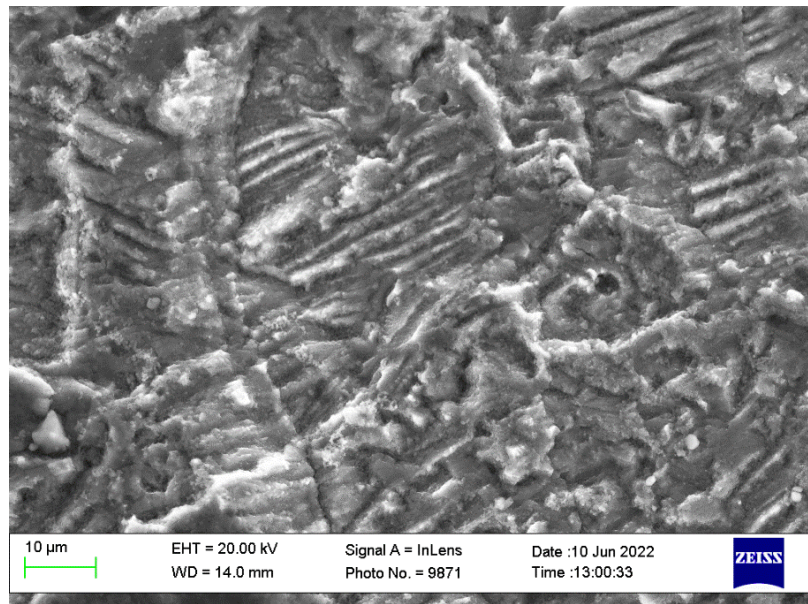


Рисунок 26 – Микрорельеф поверхности излома вблизи очага разрушения.
Направление распространения трещины слева на право, x1000

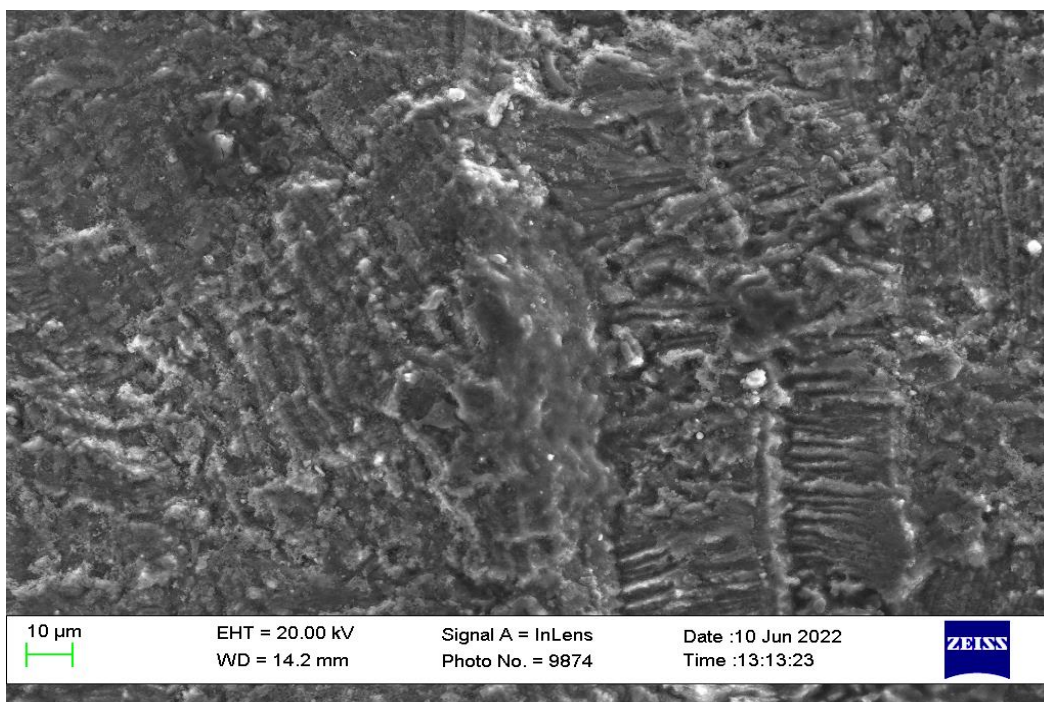


Рисунок 27 – Микрорельеф поверхности излома вдали от очага разрушения. Направление распространения трещины слева на право, x500

Усталостное разрушение волноводов из алюминиевого сплава Д16 в состоянии ТЗ под действием ультразвуковых колебаний можно рассматривать как мегацикловую усталость. Зарождение трещины при мегацикловой усталости происходит исключительно у дефектов металла, а именно микропоры, неметаллические включения и так далее. Отсюда следует вывод о том, что к металлу, из которого изготавливают ультразвуковые колебательные системы и волноводы, которые применяются при ультразвуковой сварке в условиях массового производства должны быть предъявлены повышенные требования контроля к качеству и чистоте металла. Так как, известно, что зарождение трещины при мегацикловой усталости под действием ультразвуковых колебаний происходит у дефектов металла, а именно были обнаружены неметаллические включения в микроструктуре алюминиевого сплава Д16Т.

Заключение

Бакалаврская работа посвящена актуальной проблеме анализа причин отказов ультразвуковых колебательных систем на базе магнитоотрикаторов из алюминиевого сплава Д16Т.

В волноводе №1 на базе Д16Т обнаружен необычный микрорельеф поверхности, который напоминает усталостный, состоящий из полос, которые напоминают усталостные бороздки, которые расположены параллельно фронту распространения усталостной трещины, где между такими полосами и перпендикулярно к ним располагаются мелкие усталостные бороздки.

Природу данного формирования и необычного микрорельефа структуры сплава Д16Т еще предстоит выяснить в дальнейшей исследовательской деятельности, где будет проведен дополнительный микроскопический анализ структуры.

Причиной разрушения волновода №2 на базе Д16Т является зарождение трещины при мегацикловой усталости, которое как известно происходит у дефектов металла. Отсюда следует вывод: к металлу, из которого изготавливают ультразвуковые волноводы должны быть предъявлены повышенные требования к качеству и чистоте металла.

Технические рекомендации:

- упрочнение ультразвуковых волноводов методами ППД;
- снижение конструктивных концентраторов напряжений в резьбовых соединениях;
- повышенный контроль материала на наличие внутренних дефектов в структуре материала.

Применяя данные рекомендации на предприятиях в условиях массового производства значительно увеличится долговечность ультразвуковых колебательных систем и волноводов, применяемых при ультразвуковой сварке в условиях массового производства.

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. Коцанъда 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.