

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 магнестрикторов и волноводов из титанового сплава ВТЗ-1

Обучающийся

Д.О. Ягодко

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

А.С. Селиванов, кандидат технических наук, доцент

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

Тольятти 2022

Аннотация

В данной работе темой исследования является анализ причин отказов ультразвуковых колебательных систем на базе магнестрикторов и волноводов из титанового сплава ВТЗ-1.

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

Прежде всего, в работе объектом исследования выступают волноводы из сплава титана ВТЗ-1. Во время исследований были проведены работы по разрыву деталей на специальном оборудовании, представлен фрактографический анализ трещин. Всего в работе было исследовано четыре волновода данной марки, которые отличались своей формой и местами, в которых произошла поломка.

В первой главе проведён аналитический обзор литературы на данную тему. В частности литература про волноводы, резьбовые соединения, в которых чаще всего и появляется дефект, а так же литература посвящённая определению механических свойств титановых сплавов.

Во второй главе показаны сами объекты исследования, а именно титановые волноводы. Показана методика для их исследования. Указаны инструменты, программное обеспечение и оборудование, которое позволяет получить нужные результаты.

Третья глава посвящена выводам и результатам проведённых исследований. Выводы и результаты делаются на основе полученных данных по каждому исследуемому объекту, в зависимости от чего и почему происходит разрушение внутри объекта. Построены эпюры напряжений для каждого отдельно взятого волновода.

Abstract

The present graduation work is devoted to analyzing the causes of ultrasonic oscillating system failures based on magnetostrictors and waveguides made of VT3-1 titanium alloy.

The object of the research is the waveguides made of VT3-1 titanium alloy. The research work deals with fracturing the parts by using special equipment. The fractographic analysis of cracks is also conducted. The research considers the four waveguides of this brand that are different in their shapes and places where the breakage occurs.

The first part of the investigation provides an analytical review of the corresponding sources, including those ones devoted to waveguides, threaded connections, where the fault occurs most often, as well as sources devoted to determining the mechanical properties of titanium alloys.

The second part of the research dwells on the titanium waveguides and the methods that can be used to analyze them. The tools, software and equipment that allow specialists to receive the necessary results are described as well.

The third part of the work is focused on the conclusions and the results of the research. Conclusions are drawn on the basis of the data received about each object under study, depending on the cause of the destruction. Stress-strain diagrams for each waveguide are constructed as well.

Оглавление

Введение.....	5
Глава 1. Литературный обзор.....	6
1.1 Технологии с применением ультразвука.....	6
1.2 Применение ультразвуковых технологий	7
1.3 Титановый сплав ВТЗ-1.....	8
1.4 Ультразвуковая сварка	10
1.5 Волноводы	11
1.6 Проектирование ультразвуковых колебательных систем	13
1.7 Резьбовые соединения и нагрузки.....	16
1.8 Разрушение твёрдых тел во время действия циклических нагрузок.....	19
1.9 Разрушение волноводов	21
Глава 2. Материалы и методики исследования.....	24
2.1 Анализ разрушенных ультразвуковых волноводов	24
2.2 Построение эпюр напряжений ультразвуковых волновод. Методика прочностного расчёта	26
2.3 Методика экспериментального анализа трещин в ультразвуковых волноводах. Подготовка образцов. Оборудование.....	30
Глава 3. Результаты экспериментального и теоретического исследования волноводов	34
3.1 Волновод – нож	34
3.2 Экспоненциальный волновод	37
Заключение	39
Список используемой литературы	40

Введение

Ультразвуковые технологии широко известны во многих сферах жизни, так как при его использовании мы можем наблюдать повышение качества продуктов производства, снижение затрат труда и энергии, а также сокращение времени самих технологических процессов.

На данный момент хорошо используются аппараты для проведения высокотехнологических процессов сварки, для определенных видов работ которых, требуется использование сложных форм волноводов, изготовление которых является достаточно долгой и трудоёмкой задачей.

Многие зарубежные источники проводят различного рода исследования с различного рода волноводами, но конкретным изучением проблем разрушения, причин и отказов волноводов во время работы не занимается практически никто. Следуя из этого, можно сказать, что данная работа является довольно актуальной в данный момент.

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

Глава 1. Литературный обзор

1.1 Технологии с применением ультразвука

В данный период времени ультразвук имеет довольно широкий смысл, нежели просто обозначение высокочастотной части спектра акустических волн. С данным понятием тесно связано большое количество отраслей промышленности, медицины, биологии, а также области физики [6].

В области науки данное направление получило большой скачок примерно в последние 3-4 десятилетия. Несомненно, связано это с тем, что прогресс акустики как науки не стоит на месте, развиваются её разделы, например такие как: линейная и квантовая акустика; развивается наука о твёрдом теле, электроники.

С появлением новых, достаточно надёжных средств излучения и приёма акустических волн позволяет расширить границы ультразвуковых методов. Во-первых, данные средства обеспечивают возможность существенно повысить уровень излучаемой ультразвуковой мощности, а во-вторых, позволяют продвинуть верхнюю границу диапазона излучаемых и принимаемых волн [2].

Исходя из всего вышесказанного, можно отметить, что главная особенность современного состояния физики и техники ультразвука является чрезвычайное многообразие его применения, в диапазоне от слышимого звука до предельно допустимых высоких частот.

1.2 Применение ультразвуковых технологий

Отрасли, в которых применяется ультразвук:

- металлургия – применяется для воздействия на расплавленный металл,
- микроэлектроника и приборостроение – применяется для прецизионной обработки тончайших деталей,
- химия – используется для фиксации малейших изменений в химическом составе вещества,
- акустоэлектроника – обработка электрических сигналов, которая использует преобразование их в ультразвуковые,
- акустооптика – связана с обработкой световых сигналов посредством ультразвука,
- ультразвуковая сварка – используемая для сварки полимерных материалов, металлов и сплавов, которые применяются в промышленности.

На рисунке 1 показан процесс сварки с помощью ультразвука



Рисунок 1 – процесс ультразвуковой сварки

На рисунке 2 показано используемое оборудование:



Рисунок 2 – а) ультразвуковой генератор и б) ультразвуковое устройство

1.3 Титановый сплав ВТ3-1

ВТ3-1 это такой металлический сплав, основу которого составляет титан (Ti), содержание которого находится в диапазоне от 85.95% до 91%. Несмотря на такое высокое содержание титана, в данном сплаве присутствуют хром, кремний, железо, молибден и алюминий. Допустимое количество тех или иных примесей определено по ГОСТ 19807-91 [22].

Химический состав (%): Ti (85.95-91), Al (5.5-7), Mo (2-3), Cr (0.8-2), Fe (0.2-0.7), Si (0.15-0.4), Zr (до 0.5), O (до 0.15), C (до 0.1), N (до 0.05), H (до 0.015)

Обычно такой сплав подвергают изотермическому отжигу, он обеспечивает более высокую термическую стабильность и максимальную пластичность. Это довольно жаропрочный материал, который способен работать при температурах 400 – 500 °С.

У данного сплава, как и у всех существуют свои достоинства и недостатки, которые приведены в таблице 1.

Таблица 1 – достоинства и недостатки титанового сплава ВТЗ-1

Достоинства	Недостатки
Плотность равна 4500 кг/м ³ , что способствует уменьшению массы выпускаемых изделий	Стоимость производства высока, по сравнению с тем же железом, алюминием, медью и магнием
Довольно высокая механическая прочность, которая превосходит сплавы алюминия и магния	Титан и его сплавы можно плавить лишь в вакуумной среде, так как он активно взаимодействует с газами, которые составляют атмосферу
Высокая коррозионная стойкость	Плохие антифрикционные свойства, из-за того, что титан имеет свойство налипать на многие материалы
Удельная прочность практически вдвое превосходит удельную прочность других легированных сталей	Очень плохо обрабатывается резанием

Применение:

Применяется титан в изготовлении трубопроводов, химических реакторов, клапанов, которые работают в довольно агрессивных средах, так же из него изготавливают датчики, которые работают при повышенных температурах, используется в хирургии, так как является биологически безвредным для организма. Конкретно в сфере ультразвуковых технологий титан применяется для создания сложных по конструкции волноводов [7].

1.4 Ультразвуковая сварка

На данный момент существует множество способов для соединения полимерных материалов, например такие как: клеевой, тепловой, с помощью тока высокой частоты. Но у всех этих методов есть недостатки, которые влияют на возможность провести обработку [5].

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].

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,
- 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 [2].

1.5 Волноводы

Волновод – это специальный канал (искусственный или естественный), который может распространять волны и способный поддерживать их частоту [4].

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 [3].

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 3 представлен вид ультразвуковой колебательной системы с использованием волновода на базе сплава ВТЗ-1 [23].

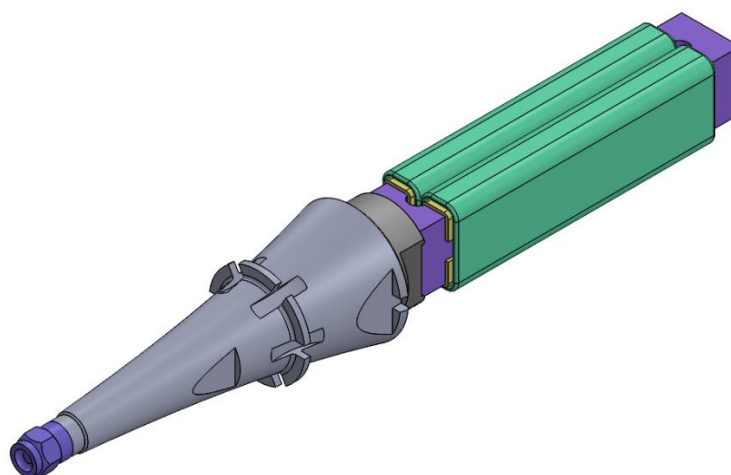


Рисунок 3 – общий вид ультразвуковой колебательной системы

Вся ультразвуковая колебательная система состоит из нескольких частей: магнестриктор 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 [13]. На рисунке 4 представлены различные виды волноводов, а на рисунке 5, конкретно волновод из титанового сплава.



Рисунок 4 – виды волноводов используемых для УЗ сварки



Рисунок 5 – волновод из титанового сплава ВТ3-1

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 [13].

1.6 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 [20].

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 6 – 7 показан конечный результат моделирования при использовании программы ANSYS.

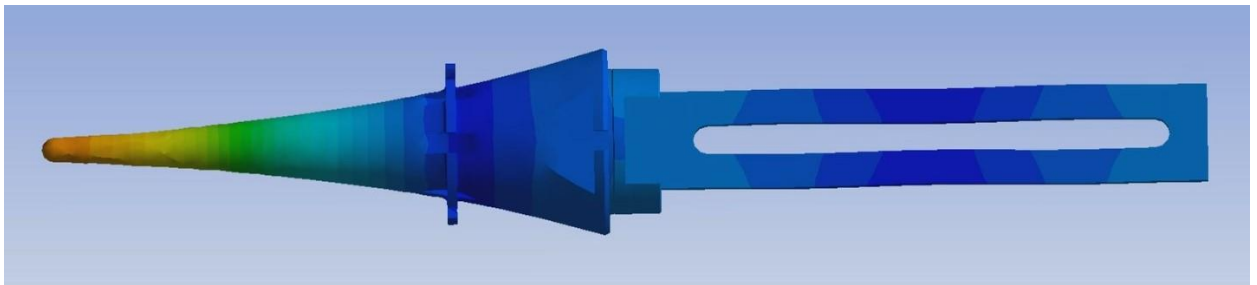


Рисунок 6 – построенная модель ультразвуковой колебательной системы с применением волновода на базе ВТЗ-1

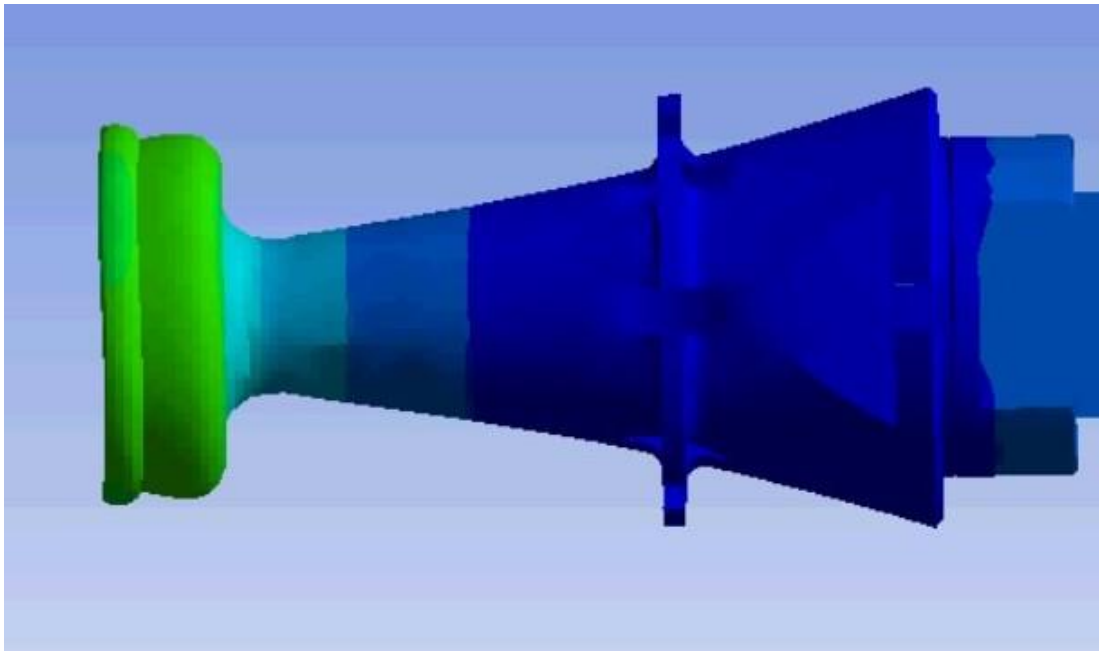


Рисунок 7 – волновод на базе ВТЗ-1, имеющий форму гриба

Расчёты проводятся на основе волнового уравнения:

$$\rho F \frac{d^2 u}{dt^2} = E \frac{d}{dx} \left(F \frac{du}{dx} \right) \quad (1)$$

где F – площадь поперечного сечения волновода; E , ρ – модуль упругости и плотность материала; u – волна смещения вдоль оси X .

Уравнение (1) чаще всего решается при условии, что на концах волновод является свободным, т.е. на концах отсутствует динамическая сила:

$du/dx = 0$ при $x = 0$ и $x = l_p$ (2). Но следует сказать, что данное условие не является абсолютно верным при ультразвуковой сварке, т.к. свариваемые детали представляют нагрузку, которая приложена к рабочему торцу.

1.7 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 [9].

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 – так же, как и просто крепёжные 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 [9].

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» [12]. 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 [21].

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» [8].

На резьбовом соединении нагрузки распределяются согласно модели Жуковского Н.Е, представленной на рисунке 8.

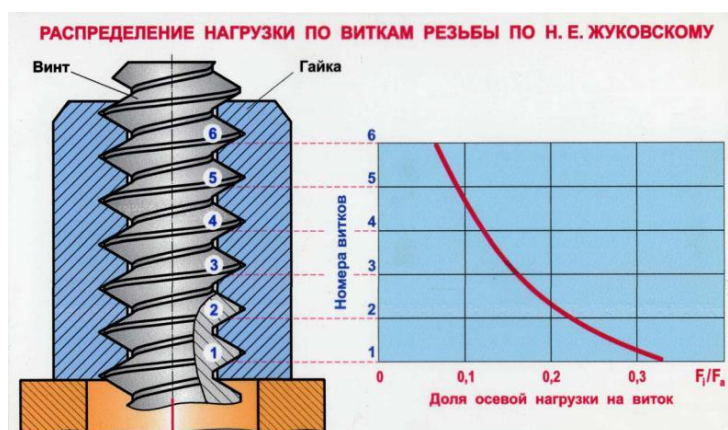


Рисунок 8 – модель распределения нагрузки в резьбовом соединении

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 [11].

1.8 Разрушение твёрдых тел во время действия циклических нагрузок

Разрушение, которое происходит под воздействием циклических нагрузок на металлические материалы, отличается от воздействия однократных нагрузок [11].

«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» [14].

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.

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.

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.

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 Смигу.

«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» [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. 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, 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.

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.

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 [10-17], таких как:

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

Волноводы, взятые, в качестве образцов подтверждают эти факторы, например, на рисунке 9 представлен волновод, разрушение в котором произошло в основании конструкции, следовательно, это является конструкционным дефектом. На рисунке 10 представлен образец, у которого разрушение произошло в резьбовом соединении из-за высокого напряжения в нём.



Рисунок 9 – волновод «нож» из сплава ВТЗ-1



Рисунок 10 – волновод экспоненциальный из сплава ВТЗ-1

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.

Глава 2. Материалы и методики исследования

2.1 Анализ разрушенных ультразвуковых волноводов

Первым делом были выбраны несколько волноводов из титанового сплава ВТ3-1 для анализа. Одним из исследуемых волноводов является волновод-нож (рисунок 11), второй волновод экспоненциальной формы (рисунок 12).

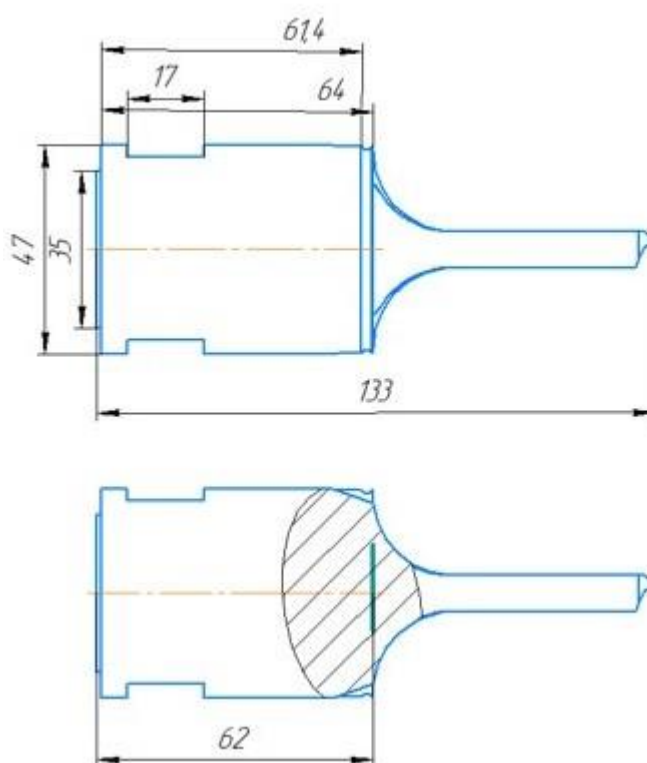


Рисунок 11 – волновод-нож из сплава ВТ3-1

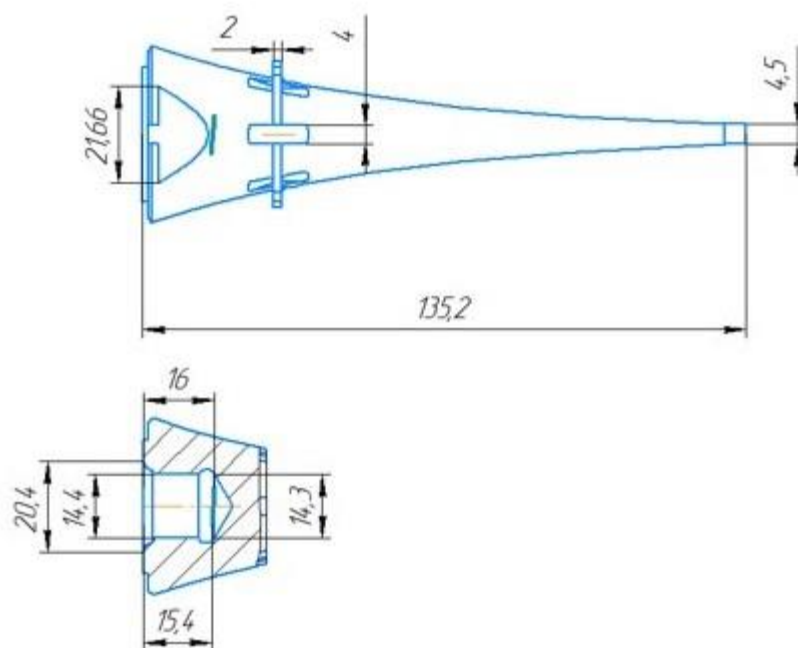


Рисунок 12 – экспоненциальный волновод на базе сплава ВТ3-1

Каждый чертёж был выполнен в программе КОМПАС – 3D с соблюдением размерности и правил построения. Так же, на каждом из чертежей указан местный разрез в том месте, где произошло разрушение, оно отмечено тёмной жирной полосой. В первом случае (рисунок 11) мы можем наблюдать, что разрушение произошло на расстоянии 62 мм от торца в основании конструкции. Это даёт нам понять, что проблема не во внутренних напряжениях резьбы, а в конструкции образца. На следующем чертеже (рисунок 12) картина меняется, здесь разрушение произошло как раз в месте резьбы, что указывает нам на проблему внутренних напряжений конкретно в резьбовом соединении.

Визуально, на рисунках 13 и 14, мы видим, что трещины, которые привели к разрушению, развиваются не с поверхности, а зарождаются внутри. В таком случае проблематично, но возможно определить примерное место их нахождения.



Рисунок 13 – волновод-нож



Рисунок 14 – экспоненциальный волновод

2.2 Построение эпюр напряжений ультразвуковых волноводов. Методика прочностного расчёта

Далее после построения чертежей и визуального анализа наших волноводов, нужно используя методику расчётов построить эпюры внутренних напряжений. Для этого используется методика Н.П. Баловнёва.

Все математические расчёты были проведены в программе MathCAD и проверены консультирующим специалистом.

Изначально были внесены данные о размерах и свойствах образца, такие как резонансная частота колебаний в резьбе, входные и выходные диаметры, длина самого образца, а так же различные координаты и коэффициенты.

Далее указаны основные данные, используемые для расчётов, которые помогут построить искомые эпюры:

f_{02} – рабочая частота колебаний напряжений в резьбе, она равна 22000Hz

ρ_2 – плотность выбранного материала

Скорость звука, являющаяся основной частью в решении уравнений:

$$C_2 = \sqrt{E_2 \cdot \rho_2} \quad (2)$$

Где C – скорость звука, E – коэффициент Пуассона; ρ – плотность материала.

d_1 и d_2 – входной и выходной диаметр волновода

Следующим этапом стало непосредственно построение эпюр напряжений, для чего использовалось построение матрицы. Ниже на рисунке 15 показаны основные части, при помощи которых были получены значения напряжений в зависимости от выбранной точки (в мм).

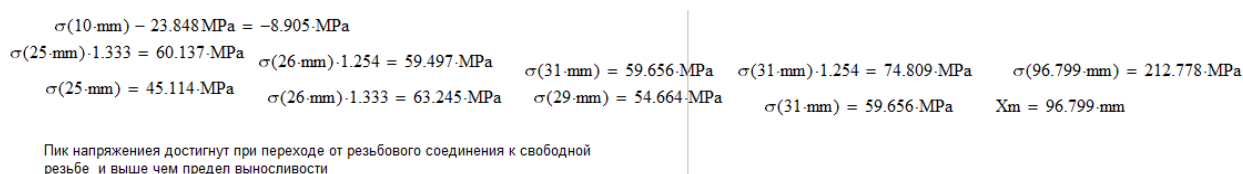


Рисунок 15 – зависимости напряжений от выбранного расстояния от торца

Далее на основании полученных данных была построена матрица (рисунок 16), благодаря которой можно получить график с изображением распределения напряжений и пиковую точку.

$A1 :=$

0	0
9.9	0
10	-8.905
25	60.137
25.5	61.685
26	189.735
29	54.664
31	63.388
40	111.573
50	150.177
60	189.786
70	227.316
75	244.078
80	258.735
90	279.073
96.799	282.511
100	282.511
105	275.888
110	262.579
115	241.726
125	174.018
135	66.417
139	0

Рисунок 16 – матрица для построения графика

На рисунке 17 можно увидеть эпюру напряжений, которая была построена в результате проведенных выше вычислений.

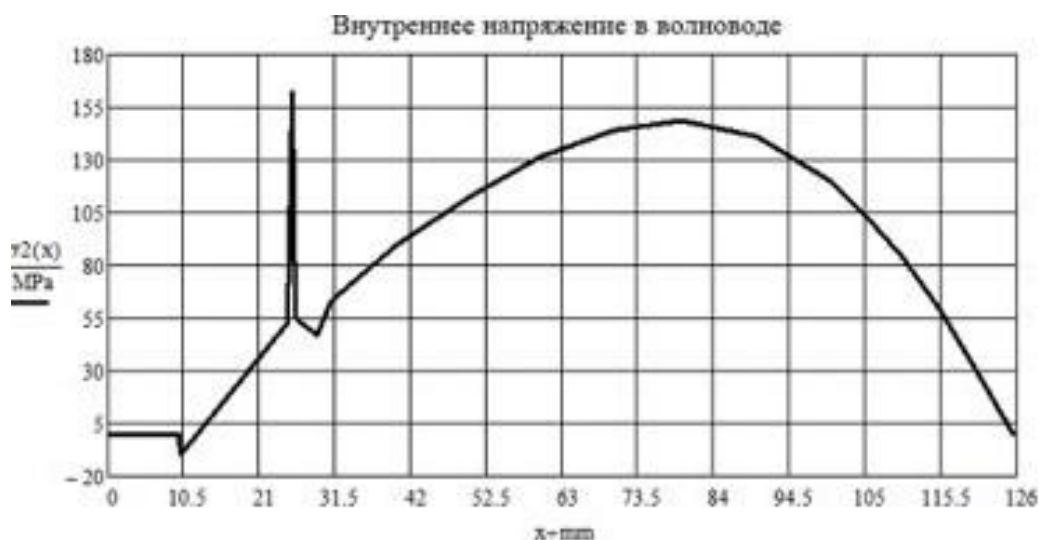


Рисунок 17 – эпюра напряжений в экспоненциальном волноводе

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 126), в одном месте которой, мы видим резкий скачок напряжений, который исходя из чертежа, приходится на место резьбового соединения.

Исходя из этого, можно сделать вывод, что пик напряжений, получившийся, в результате построения графика совпадает с местом нахождения резьбового соединения на чертеже, что даёт ясно понять, что появление трещины связано напрямую с напряжениями в резьбе при работе ультразвукового волновода.

Для второго волновода проводились идентичные расчёты, но результат оказался абсолютно другим. На рисунке 18 показана эпюра напряжений для волновода-нож.

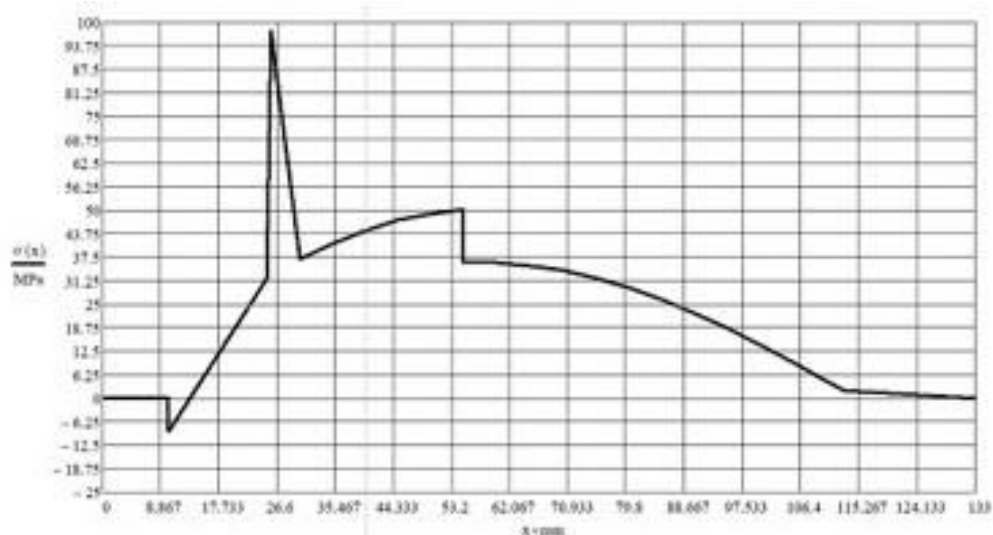


Рисунок 18 – эпюра напряжений волновода-нож

Несмотря на то, что пик напряжений приходится на место расположения резьбового соединения, разрушился сам образец не там, а в своём основании, где такого пика напряжений нет. Следовательно, можно сделать вывод, что разрушение данного волновода связано не с напряжением в резьбовом соединении, а с дефектами в конструкции образца.

2.3 Методика экспериментального анализа трещин в ультразвуковых волноводах. Подготовка образцов. Оборудование

Построение эпюр, чертежей и расчётов являлось теоретическим анализом. После него мы перешли к практическому анализу, который подразумевал осмотр мест трещин на микроскопе, с целью фрактографического анализа.

Первым делом образцы были отданы в лабораторию для проведения вскрытия места трещины.

На рисунке 19 показано оборудование, которое использовалось для вскрытия трещины.



Рисунок 19 – разрывная машина Shimadzu AGX-V

Данная установка помогла нам разорвать образец и получить доступ к трещине, которая находилась внутри (рисунок 8). В случае с экспоненциальным волноводом (рисунок 9) разрыв не понадобился, и место где находилась трещина, было вырезано с помощью эрозии.

Далее в случае с волноводом-нож была проведена дополнительная обработка, конкретно волновод был разорван, после чего часть на которой находился разлом отпилена до ширины в 10 мм для того, чтобы образец можно

было удобно поместить в микроскоп. В случае с экспоненциальным волноводом обработка не понадобилась, так как вырезанная часть отлично подходила для анализа.

После выполненных обработок каждый из образцов был помещён на поверхность подложки и плотно зафиксирован. В данном эксперименте использовался электронный микроскоп Zeiss SIGMA, способный обеспечить отличное качество изображения и точные аналитические результаты (рисунок 20).



Рисунок 20 – электронный микроскоп Zeiss SIGMA

Данный электронный микроскоп находится в Научно-исследовательском отделе ТГУ, обладает большим количеством функций и направлен на детальное изучение помещенного в него образца. Увеличение, которое способен дать данный микроскоп составляет до $\times 5000$.

Также, микроскоп обладает специальной технологией GEMINI, которая довольно проста в использовании и позволяет делать фотографии в отличном качестве, при этом работая на низком рабочем напряжении, а также при стабильном токе.

Образцы, которые можно изучить на данном микроскопе могут достигать диаметра в 250 мм и иметь длину до 145 мм.

Однако в зависимости от количества исследуемых за раз образцов их размерность будет меняться, и для каждого будет необходимо провести соответствующую механическую обработку, с целью придания нужной размерности.

Глава 3. Результаты экспериментального и теоретического исследования волноводов

3.1 Волновод – нож

Вид волновода представлен на рисунке 21. Общий вид излома и направление распространения трещины показано на рисунке 22. Видно, что разрушение волновода произошло в результате усталостного распространения трещины. Усталостная трещина зародилась вблизи поверхности волновода (рисунок 23). При большом увеличении на поверхности излома видны усталостные бороздки (рисунки 24 и 25).



Рисунок 21 – общий вид волновода из титанового сплава



Рисунок 22 – общий вид усталостного излома волновода из титанового сплава

Стрелкой на данном рисунке показано направление распространения усталостной трещины.

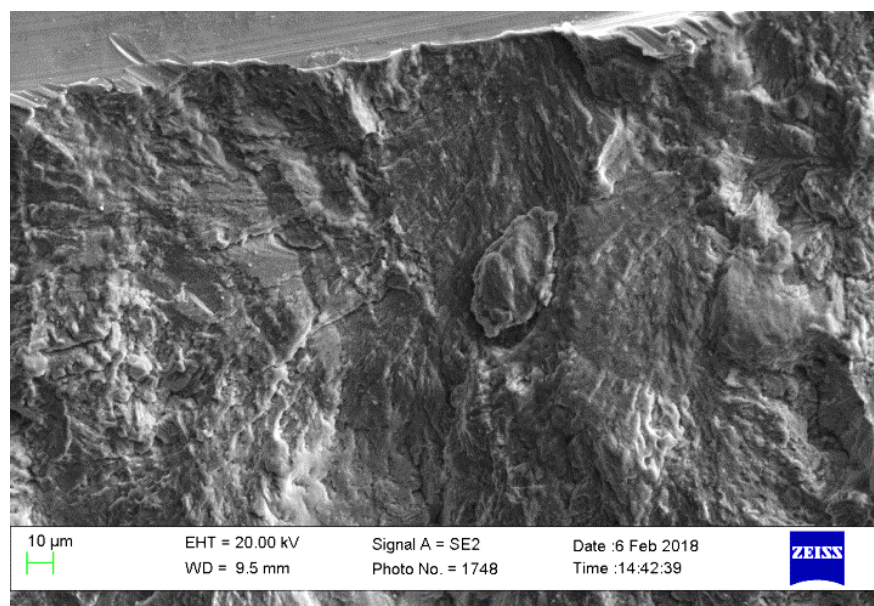


Рисунок 23 – очаг зарождения усталостной трещины. x350

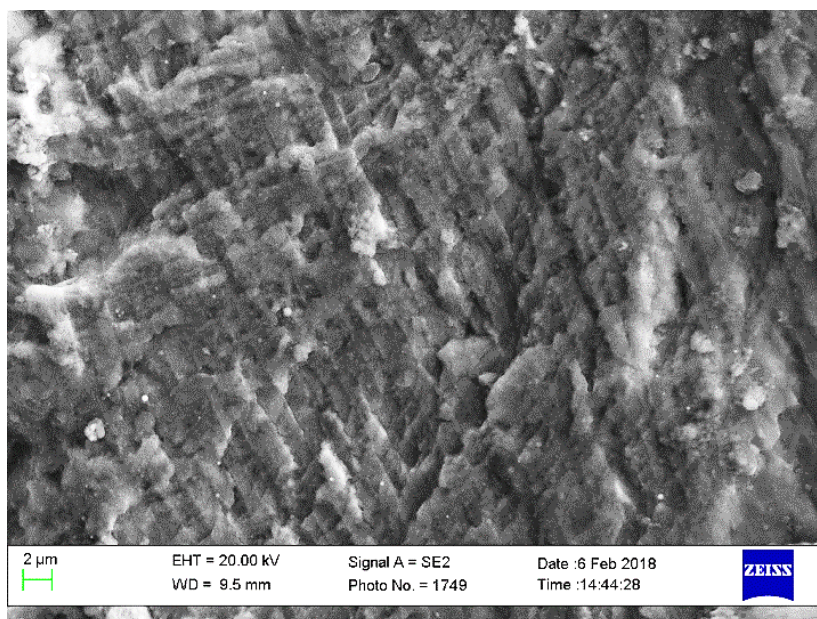


Рисунок 24 – микрорельеф излома волновода из титанового сплава вблизи очага зарождения трещины. а- x2000

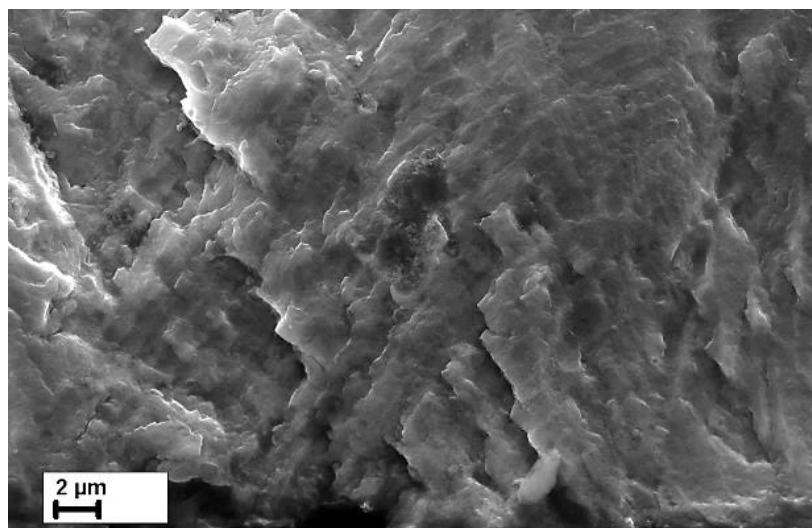
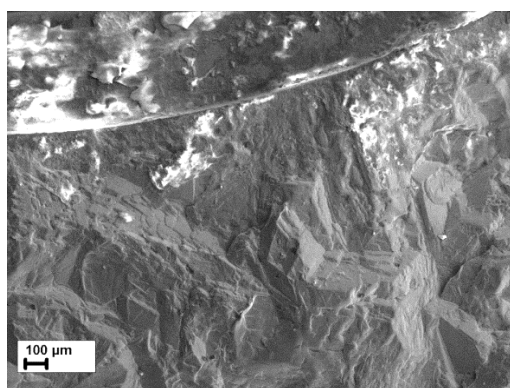


Рисунок 25 – микрорельеф излома волновода из титанового сплава в дали от очага зарождения трещины. а- x2000, б- x3000

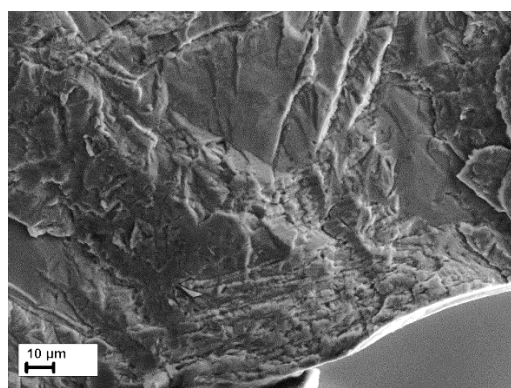
Делая вывод касательно данного волновода, можно сказать, что разрушение произошло по усталостному механизму.

3.2 Экспоненциальный волновод

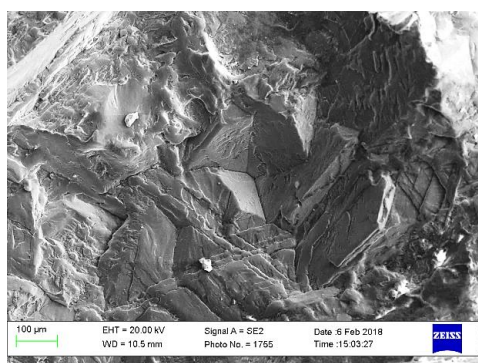
В случае с данным волноводом из литого сплава, выявить зарождение трещины не всегда возможно (рисунок 26 а, б). Микрорельеф центральной части изломов состоит из участков с хрупким межзёрненным разрушением и сколом с хрупкими усталостными бороздками (рисунок 26 в, г).



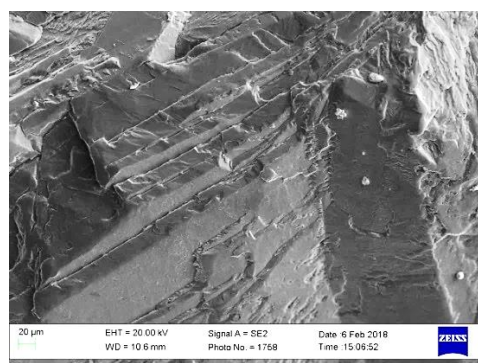
а)



б)



в)



г)

Рисунок 26 – микрорельеф излома волновода из литого сплава в очаге разрушения со стороны внутренней резьбовой поверхности (а) и внешней

поверхности (б) и, а также в центральной части изломов (в, г). (РЭМ). а-х48, б- х600, в- х100, г- х200 (д) стрелками указаны усталостные бороздки

Исходя из это можно сделать вывод, что высокая концентрация напряжений в резьбовом соединении данного волновода повлияла на зарождение усталостной трещины, которая в последствии привела к отказу. Конкретно такие экспоненциальные волноводы используют для точечной сварки небольших деталей, так как имея такую геометрическую форму, они способны провести сварное соединение, практически не испортив внешний вид заготовки.

Резьбовое соединение является довольно серьезным концентратором напряжений. Исходя из статистики, проведённой в период с 2018 по 2022 год, было выявлено, что 70% из всех волноводов, которые вышли из строя поломка приходится на резьбовое соединение, и только остальные 30 приходятся на дефект материала или же конструкционную часть.

Заключение

В выпускной квалификационной работе выполнены теоретические и экспериментальные исследования причин отказа ультразвуковых колебательных систем на базе магнитострикционных преобразователей и ультразвуковых волноводов различной конструкции из титанового сплава ВТЗ-1. В ходе выполнения работы выполнен визуальный анализ образцов, построение эпюр напряжений, испытание на растяжение и фрактографический анализ. Установлено, что основными причинами разрушения являются многоцикловая усталостная нагрузка, а разрушение волноводов зарождается от внутренних дефектов материала или от геометрических концентраторов напряжений, обусловленных конструкцией волновода. При этом, основной причиной разрушения является пик напряжений в резьбовом соединении при ультразвуковой нагрузке, дополнительно причиной разрушения служит сама резьба, т.к. она служит концентратором напряжений.

Технические рекомендации:

- упрочнение ультразвуковых волноводов с помощью методов поверхностного пластического деформирования,
- снижение конструкционных концентраторов напряжений в резьбовых соединениях,
- контроль материала на наличие внутренних дефектов

Тем самым благодаря данным рекомендациям можно увеличить срок эксплуатации оборудования, улучшить их свойства и характеристики, тем самым уменьшить расходы предприятия в условиях массового производства и избежать простоя из-за преждевременно вышедших из строя волноводов.

Список используемой литературы

1. 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.
2. S. Periyannan; P. Rajagopal; K. Balasubramaniam (2015) Robust Ultrasonic Waveguide Based Distributed Temperature Sensing [Text] Physics Procedia 70, 514-518
3. 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
4. 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
5. A. Ramkumar; A. Lal. (2012) Microscale ultrasonic sensors and actuators [Text] Woodhead Publishing 18, 572–618
6. Аграната Б.А. Ультразвуковые технологии: Металлургия, 1974. – 504 с.
7. Балдев, Радж, В. Раджендран, П. Паланичами Применения ультразвука 2006. – 576 с.
8. Баловнев Н. П. Расчет резьбовых соединений и винтовых механизмов 1999 - 40 с.
9. Биргер И.А. Об одном критерии разрушения и пластичности. – Механика твердого тела 1977 – 240 с.
10. Ботвина Л. Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов. - М: Наука, 1989.- 230 с.
11. Владимиров В. И. Физическая природа разрушения материалов. - М.: Металлургия, 1984.- 280 с.
12. Иванова В.С., Шанявский А.А. Количественная фрактография.

13. Ильин А.А., Колачёв Б.А., Польшкин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства, 2009. — 520 с
14. Клевцов Г. В., Лабораторный практикум по курсу «Материаловедение» для технических направлений подготовки бакалавров. - Тольятти: ТГУ, 2015.- 148 с.
15. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени 1977 - 232 с.
16. Коцаньда С. Усталостное разрушение металлов. - М.: Металлургия, 1975. - 456 с.
17. Мороз Л. С. Механика и физика деформаций и разрушения материалов. - Л.: Машиностроение, 1984. - 224 с
18. Розенберг Л.Д. Физические основы ультразвуковой технологии. М., Наука, 1970. -689 с.
19. Сырников Е.П. Расчет резьбовых соединений. Методические указания по разделу курса «Детали машин». М.: МАМИ, 1979. 31 с.
20. Теумин И. Ультразвуковые колебательные системы, 1959 – 332 с.
21. Хажинский Г.М., Основы расчетов на усталость и длительную прочность 2016 – 168 с.
22. Холопов Ю. В. Ультразвуковая сварка М., Машиностроение, 1972. – 224 с.
23. Чечулин Б.Б. Титановые сплавы в машиностроении, 1977 - 248 с.
24. Энгель Л., Клингел Г. Растровая электронная микроскопия. Разрушение: Справ. изд. – М.: Металлургия, 1986.- 232 с.