

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 хирургических
инструментов из титанового сплава ВТЗ-1 для остеотома и артропластики

Обучающийся

Е.С. Сидлерова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент - А.С. Селиванов

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

Тольятти 2023

Аннотация

Данная выпускная квалификационная работа состоит из 48 страниц, 1 таблица, 18 рисунков и 27 источников.

В данной работе темой исследования является разработка технологии упрочнения хирургического инструмента 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.

В первой главе проведён аналитический обзор литературы на данную тему. В частности, литература про титановый сплав ВТЗ-1, остеотоме и артропластике, о волноводах, в которых и появляются дефекты, а также ультразвуковая колебательная система. Механизм и состав деталей самого инструмента.

Во второй главе проведен теоретический анализ причин разрушения волноводов. А также анализ видов упрочнения поверхностной пластической деформации, для выявления самого эффективного. После подробнее изучен метод алмазного выглаживания, так как он оказался эффективнее других. И описанием небольшого эксперимента.

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.

В заключении были сделаны общие выводы всей исследовательской работы. А также были проанализировано качество выполнения поставленных задач.

Abstract

This graduation thesis consists of 48 pages, 1 table, 18 figures, and 27 references.

The research topic of this thesis is the development of a technology for strengthening surgical instruments made of titanium alloy VT3-1. The thesis begins with an introduction that presents the relevance, objective, justification, and tasks of the study. The research focuses on waveguides made of titanium alloy VT3-1 as the object of investigation.

The first chapter provides an analytical literature review on the topic. It covers literature on titanium alloy VT3-1, osteotomy and arthroplasty, waveguides, which are where defects occur, and the ultrasonic oscillation system. It also explores the mechanism and composition of the instrument's components.

The second chapter presents a theoretical analysis of the reasons for waveguide failure. It also analyzes different methods of surface plastic deformation strengthening to determine the most effective one. The diamond smoothing method is studied in detail as it proves to be more effective than others. An experiment related to this method is also described.

The third chapter is dedicated to the conclusions and results of the conducted research. The conclusions and results are drawn based on the obtained data for each investigated object, explaining the causes of failure within the object.

In the conclusion, overall conclusions of the entire research work are presented. The quality of accomplishing the set tasks is also analyzed.

Please note that this is a generated translation, and while it aims to provide a general understanding of the content, it may not be a perfect translation.

Содержание

Введение.....	5
1 Обзор научных трудов и исследований	7
1.1 Принцип работы и виды насадок для ультразвукового хирургического инструмента	7
1.2 Волноводы и инструменты для ультразвуковых хирургических инструментов из титанового сплава.....	12
1.3 Использование титанового сплава ВТЗ-1 в изготовлении волноводов и его преимущества в медицине	19
2 Анализ причин разрушения волноводов из титанового сплава ВТЗ-1.....	22
2.1 Классификация типов разрушения материалов в условиях высокочастотных вибраций	22
2.2 Анализ и исследование механизмов разрушения ультразвукового волновода хирургического инструмента	24
2.3 Методы повышения усталостной прочности материалов	27
3 Разработка технологии упрочнения ППД ультразвуковых инструментов из титанового сплава ВТЗ-1	38
3.1 Методика проведения исследований	38
3.2 Результаты экспериментального исследования.....	40
Заключение	43
Список используемой литературы и используемых источников.....	44

Введение

Повышение качества, надежности и долговечности изделий является одной из основных задач в машиностроении. Изменения химического состава и структуры металлов и сплавов, можно получить сплавы почти с любыми наперед заданными свойствами – сверхтвердые, жаростойкие, сверхпрочные и другие.

Актуальность данного исследования заключается в важности и востребованности технологии по упрочнению поверхностного слоя для создания деталей машин при высоких скоростях, металлообрабатывающих инструментов с высокой прочностью поверхностного слоя, а также для ультразвуковых технологий.

В данной работе рассматривается именно ультразвуковые установки, так как они широко применяются в различных областях. Такие установки используются в различных производственных процессах, таких как сварка, очистка и резка. Ультразвуковая сварка широко используется в автомобильной и аэрокосмической промышленности для соединения металлических и пластмассовых деталей.

Ультразвуковые установки используются в медицинской визуализации, такой как ультразвуковое сканирование, для визуализации внутренних органов и тканей. Ультразвуковые хирургические инструменты также используются в малоинвазивных операциях для выполнения точных и контролируемых процедур. [2,4]

В процессе эксплуатации поверхность изделий, подвергается интенсивному износу и именно с неё в большинстве случаев начинается потеря служебного назначения по одному из эксплуатационных свойств - усталостная трещина, абразивный износ, коррозия и др.

При решении указанной проблемы в промышленности на завершающей стадии техпроцесса изготовления деталей применяют различные финишные методы технологического обеспечения качества поверхностного слоя -

преимущество технологии поверхностно-пластического деформирования. Данные методы заключаются в том, что благодаря пластическому течению металла деформированные выступы заполняют впадины профиля, увеличивая опорную длину и несущую способность поверхности.

Макроотклонения не исправляются ввиду упругого контакта инструмента и заготовки, а объём детали не изменяется. В результате деформации происходит формирование упрочнённого слоя с равномерным градиентом спада микротвёрдости, остаточных сжимающих напряжений и глубины наклёпа.[5]

Целью выпускной работы: разработка эффективного технологического метода по упрочнению поверхностного слоя волноводов из титанового сплава ВТЗ-1, который исполняет роль насадки для ультразвукового хирургического инструмента.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить и проанализировать научную литературу и подобрать оборудование;
- провести сравнительный анализ всех методов упрочнения поверхностного слоя;
- доработать выбранную технологию по упрочнению волноводов из титанового сплава ВТЗ-1 для хирургического инструмента.
- провести и проанализировать эксперимент по упрочнению волновода из титанового сплава ВТЗ-1 с помощью алмазного выглаживания.

1 Обзор научных трудов и исследований

1.1 Принцип работы и виды насадок для ультразвукового хирургического инструмента

Ультразвуковые хирургические инструменты стали важным инструментом в современной хирургической практике благодаря их точности, эффективности и способности минимизировать повреждение окружающих тканей.

В свою очередь использование ультразвуковой энергии в хирургии основано на наложении низкочастотных колебаний на хирургический инструмент различной формы (скальпель, пила, распатор и др.). При этом усиливается их функциональная способность (например, облегчается резание тканей скальпелем). Это создает условия для меньших физических усилий в процессе проведения различных операций и этим самым в значительной мере уменьшает травму, наносимую тканям, окружающим раневую поверхность.[23]

Преимущество использования в хирургической практике ультразвуковых колебаний обуславливается рядом их физических особенностей, и, прежде всего, их прямолинейным направлением в твердых и жидких средах, в отличие от звуковых колебаний, распространяющихся в форме сферы.

Для создания ультразвуковой хирургической аппаратуры используются колебания в пределах 20—100 кГц. Чем больше частота ультразвуковых волн, тем прямолинейнее они распространяются.

Ультразвуковой хирургический инструмент — это медицинское устройство, которое использует высокочастотные звуковые волны для выполнения хирургических процедур. Принцип действия ультразвукового хирургического инструмента заключается в генерировании и фокусировке высокочастотных звуковых волн на месте операции для выполнения точных и

минимально инвазивных процедур. На рисунке 2 изображен ультразвуковой хирургический инструмент [23].

Прибор состоит из трех основных компонентов: преобразователя, волновода и наконечника. Преобразователь генерирует высокочастотные звуковые волны, которые затем передаются по волноводу на наконечник. Наконечник содержит линзу, которая фокусирует звуковые волны на месте операции. (добавить картинку с прибором и отметить его части)



Рисунок 1 – Ультразвуковой хирургический инструмент

Когда звуковые волны вступают в контакт с тканью, они вызывают вибрацию и выделяют тепло. Этот процесс известен как кавитация и используется для разрушения тканей или коагуляции кровеносных сосудов. Тепло, генерируемое звуковыми волнами, также помогает уплотнить ткани, сводя к минимуму кровотечение и снижая риск заражения.

Ультразвуковой хирургический инструмент может использоваться для различных процедур, включая резку, коагуляцию и удаление тканей. Это особенно полезно для выполнения процедур в областях, где традиционные хирургические методы могут быть трудны или невозможны для использования, например, в головном или спинном мозге.

В целом, принцип действия ультразвукового хирургического инструмента предполагает использование высокочастотных звуковых волн для выполнения точных и минимально инвазивных хирургических процедур.

Инструмент предназначен для генерации и фокусировки звуковых волн на месте операции, где их можно использовать для разрушения тканей или коагуляции кровеносных сосудов, сводя к минимуму кровотечение и снижая риск заражения.[1]

Ультразвуковой хирургический инструмент применяется в различных операциях в том числе, и в артропластике и остеотомии.

Остеотома — это заболевание, которое относится к развитию доброкачественной опухоли кости, также известной как остеоидная остеома, в длинных костях тела, таких как бедренная кость или большеберцовая кость.[11] На рисунке 2 представлен рентген коленного сустава при остеотоме.



Рисунок 2 – Рентген коленного сустава при остеотоме

Лечение остеотомы обычно включает удаление опухоли с помощью процедуры, называемой хирургическим иссечением. Это включает в себя использование небольшого разреза для доступа к опухоли и удаления ее из кости.

Артропластика — это хирургическая процедура, которая включает в себя реконструкцию или замену сустава, поврежденного в результате травмы или заболевания. [3] Целью эндопротезирования является восстановление

функции сустава, уменьшение боли и улучшение качества жизни пациента. На рисунке 3 изображен фиксатор сустава колена и волновод, который используют в данной операции.

Процедура включает в себя удаление поврежденного или больного сустава и замену его искусственным суставом, известным как протез.



Рисунок 3 – Фиксатор для коленного сустава и насадка для выполнения артропластики.

Основные задачи этих операций несильно отличаются, но все же выполняются по разному, что приводит к пониманию того, что данный инструмент может иметь разные виды насадок. Которые представлены ниже:

- лезвия используются для разрезания тканей и могут быть прикреплены к наконечнику ультразвукового хирургического инструмента. Доступны различные типы лезвий, включая прямые, изогнутые и наклонные лезвия;

- зонды используются для точного рассечения тканей и могут быть прикреплены к наконечнику ультразвукового хирургического инструмента. Они бывают различных форм и размеров, включая прямые, изогнутые и наклонные зонды;

– чехлы используются для защиты зонда во время введения и могут быть прикреплены к наконечнику ультразвукового хирургического инструмента. Они бывают различных размеров и форм для размещения различных типов зондов;

– ножницы используются для разрезания тканей и могут быть прикреплены к наконечнику ультразвукового хирургического инструмента. Доступны различные типы ножниц, включая прямые, изогнутые и угловые ножницы;

– захваты используются для удержания тканей и манипулирования ими и могут быть прикреплены к наконечнику ультразвукового хирургического инструмента. Они бывают различных форм и размеров, включая прямые, изогнутые и угловые захваты;

– крючки используются для втягивания ткани и могут быть прикреплены к наконечнику ультразвукового хирургического инструмента. Они бывают различных форм и размеров, включая прямые, изогнутые и угловые крючки.[17]

В данной исследовательской работе рассматриваются именно плоские насадки. Они обычно используются в процедурах, где важны точность и контроль, например, в нейрохирургии или офтальмохирургии. Распространенные типы насадок для лезвий включают в себя:

– прямые лезвия обычно используются для общих хирургических процедур, таких как разрезание и рассечение тканей;

– изогнутые лезвия предназначены для того, чтобы позволить хирургам перемещаться по изогнутым структурам, и обычно используются в нейрохирургии и хирургии позвоночника;

– угловые лезвия используются для процедур, требующих более точного угла резания, например, в офтальмологической хирургии или пластической хирургии;

- зазубренные лезвия имеют небольшие зубцы по краю лезвия, что позволяет легче разрезать жесткие ткани, такие как кости или хрящи;
- микроножницы очень маленькие и часто используются для деликатных процедур, таких как офтальмохирургия или сосудистая хирургия;
- гармонические лезвия предназначены для вибрации на высоких частотах, что обеспечивает точное разрезание и коагуляцию ткани. Они широко используются в лапароскопической хирургии и других малоинвазивных процедурах. [18]

Сами насадки представляют из себя волноводы, которые предназначены для фокусировки ультразвуковой энергии в меньшей и более концентрированной области, что обеспечивает более точную резку и коагуляцию. Они также могут быть использованы для доставки лекарств или других веществ непосредственно к месту операции.

1.2 Волноводы и инструменты для ультразвуковых хирургических инструментов из титанового сплава

В рамках реализации научно-исследовательского договора № 0122204 от 03.10.2022 года, заключённого между Тольяттинским государственным университетом и ООО «МЕДТЭК», в университете на базе Центра ультразвуковых технологий разработан прототип ультразвукового комплекса для остеотома и артропластики. Комплекс включает в себя ультразвуковой генератор и два хирургических инструмента, оснащенных ультразвуковыми колебательными системами на базе пьезокерамических преобразователей, ультразвуковых бустеров и инструментов-насадок из титанового сплава ВТЗ-1. Общая схема инструментов с насадками представлена на рисунке 4.

Инструменты-насадки представляют собой резонансные системы и предназначены для трансформации ультразвуковой энергии в зону воздействия, концентрируя ее таким образом, чтобы обеспечить

максимальный эффект введения энергии ультразвуковых колебаний. К инструментам предъявляются особые требования по точности механической обработки.

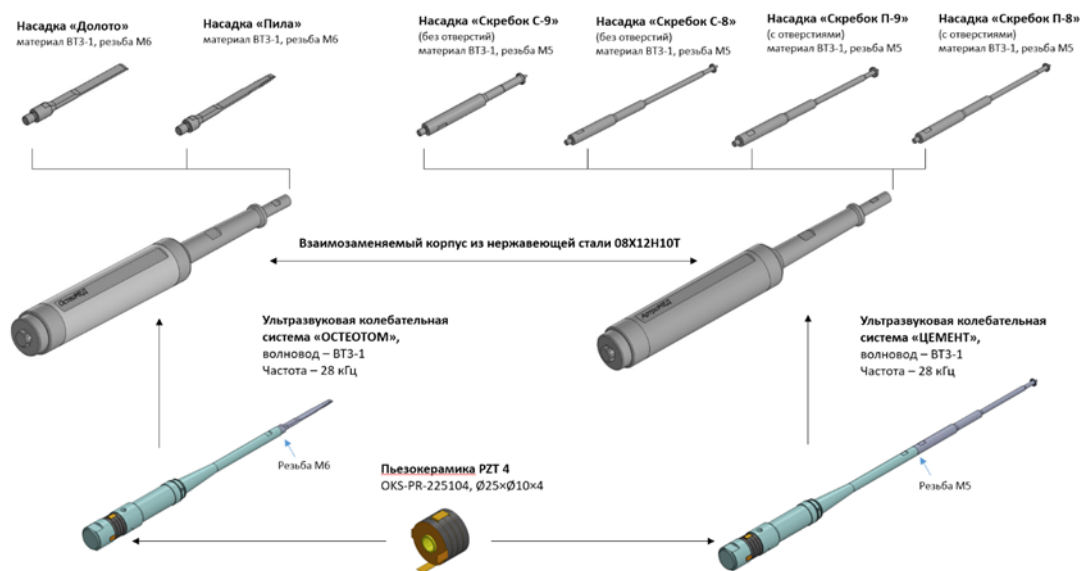


Рисунок 4 – Общая схема ультразвуковых хирургических инструментов (предоставлена Центром ультразвуковых технологий ТГУ)

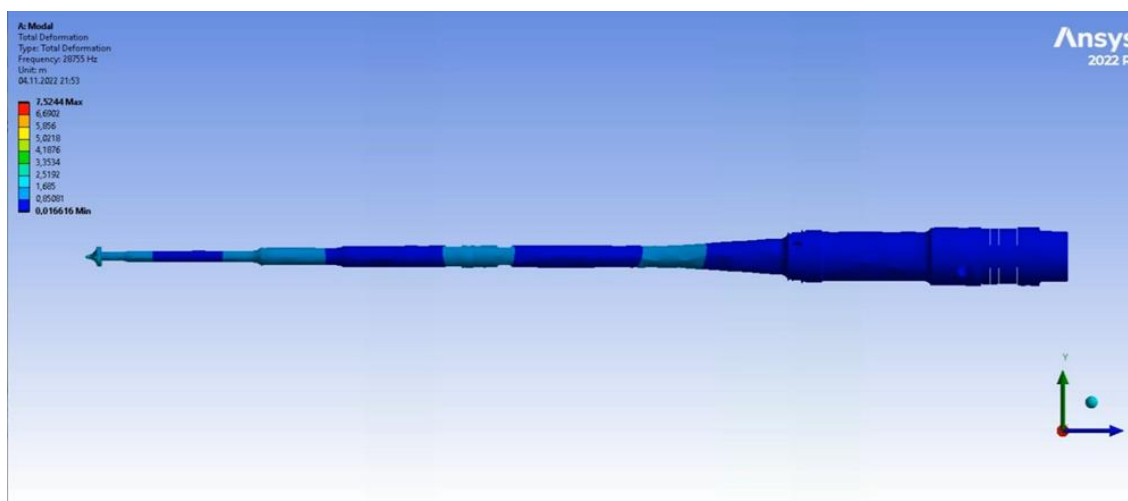
Проектирование и расчет ультразвуковых колебательных систем на резонансные частоты осуществляется с применением специализированного программного обеспечения. На рис. Представлены некоторые результаты моделирования в ПО ANSYS.

Волноводы, являются рабочей частью ультразвуковой колебательной системы и имеют разные виды насадок.

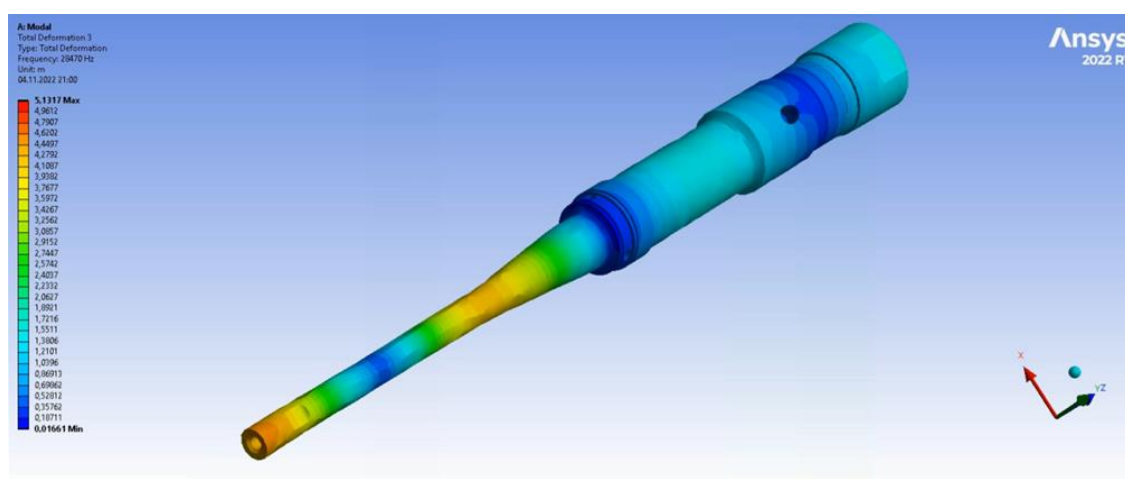
Волновод — это структура, которая используется для направления и ограничения электромагнитных волн, таких как микроволны. Принцип работы волновода основан на распространении волн и способности поддерживать их частоту.[22]

Результаты моделирования позволяют определить геометрические размеры всех звеньев системы таким образом, чтобы вся система при возбуждении в ней колебаний работала в резонансе. Особенностью

разработанных хирургических инструментов-насадок, учитывая их медицинское назначение, является достаточно малый диаметр по отношению к их длине, что предъявляет определенные требования к прочности материала и в первую очередь к стойкости к зарождению трещин.



А)



б)

Рисунок 5 – Результаты моделирования ультразвуковых колебательных систем для хирургических инструментов в ПО ANSYS/ изображены на рисунках а) и б)

Результаты моделирования позволяют определить геометрические размеры всех звеньев системы таким образом, чтобы вся система при возбуждении в ней колебаний работала в резонансе. Особенностью разработанных хирургических инструментов-насадок, учитывая их медицинское назначение, является достаточно малый диаметр по отношению к их длине, что предъявляет определенные требования к прочности материала и в первую очередь к стойкости к зарождению трещин.

На рисунках 6 и 7 представлены два вида волноводов. Плоский волновод предназначен для операции остеотомы, а цилиндрической формы для артропластики.



Рисунок 6 - Волновод для процедуры артропластика

Проектирование УЗК систем является важной областью исследований в области инженерии. Эти системы используются в самых разных областях применения, включая сварку, очистку и резку. Проектирование этих систем включает в себя выбор подходящего преобразователя, определение резонансной частоты системы и оптимизацию связи между преобразователем и нагрузкой. Ниже представленная на рисунке 8 ультразвуковая колебательная

система, которая была разработана на базе Тольяттинского государственного университета в центре Ультразвуковых технологий.



Рисунок 7 – Волновод для процедуры остеотома



Рисунок 8 - Ультразвуковая колебательная система

Преобразователь является основой ультразвуковой колебательной системы. Выбор преобразователя зависит от конкретного применения и

желаемого диапазона частот. Распространенные типы преобразователей включают пьезоэлектрические и магнитострикционные преобразователи. [7]

Определение резонансной частоты системы также является важным этапом в процессе проектирования. Резонансная частота — это частота, на которой система вибрирует наиболее эффективно, и она определяется физическими характеристиками преобразователя и нагрузкой. Резонансная частота может быть рассчитана с помощью математических моделей или измерена экспериментально.

Оптимизация связи между преобразователем и нагрузкой является еще одним важным аспектом проектирования ультразвуковой колебательной системы. Соединение определяет эффективность, с которой преобразователь передает энергию нагрузке, и ее можно повысить, выбрав соответствующие материалы и обеспечив правильное совмещение преобразователя и нагрузки.

Процесс создания и проектирования УЗКС разбит на несколько этапов. Сначала проводится предварительный расчет по известным методикам, затем происходит моделирование. После этого начинается процесс реализации рассчитанной конструкции, а затем производится измерение параметров полученной УЗКС. На основе полученных экспериментальных данных производится финальный расчет и поправки. [10]

На рисунке 9 изображена УЗК система, на которой отображены её основные части.

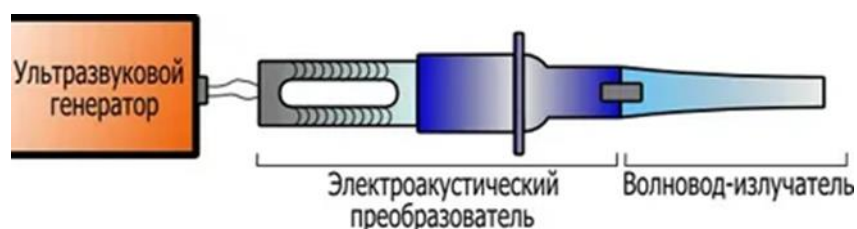


Рисунок 9 - Ультразвуковая колебательная система

Ниже приведены элементы конструкции УЗК 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 обрабатывающий инструмент или заготовку;

– рупор — это компонент, который еще больше усиливает амплитуду колебаний и передает их на обрабатывающий 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. [14]

1.3 Использование титанового сплава ВТЗ-1 в изготовлении волноводов и его преимущества в медицине

Волноводы для УЗК сделаны из титанового сплава ВТЗ-1, который имеет множество преимуществ.

Данный сплав известен своей высокой прочностью, ударной вязкостью и коррозионной стойкостью. В таблице 1 отображен химический состав титанового сплава ВТЗ-1 в процентном соотношении.[3]

Таблица 1 - Химический состав титанового сплава ВТЗ-1 в %

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

Расшифровка стали:

Буква «В» означает, что сплав разработан во Всероссийском научно-исследовательском институте авиационных материалов (ВИАМ). «Т» обозначает металл сплава — титан, а цифра 3-1 указывает на порядковый номер сплава.[13]

Сплав ВТЗ-1 изготавливается различными методами, включая вакуумно-дуговой переплав, электронно-лучевую плавку и порошковую металлургию. Сплав обычно подвергается термической обработке для

достижения желаемой микроструктуры и механических свойств. Процесс термообработки включает нагрев сплава до определенной температуры, выдержку его при этой температуре в течение определенного периода времени, а затем охлаждение с контролируемой скоростью.

Микроструктура сплава ВТЗ-1 состоит из смеси альфа- и бета-фаз, причем бета-фаза упрочняется добавлением алюминия и олова. Сплав также содержит небольшое количество кислорода и азота, которые могут повлиять на его механические свойства.

Сплав ВТЗ-1 обладает превосходной коррозионной стойкостью в различных средах, включая морскую воду, кислые и щелочные растворы, а также высокотемпературные газы. Он также обладает хорошей свариваемостью и легко поддается формованию и механической обработке.

В целом, сплав ВТЗ-1 является высокоэффективным материалом, который хорошо подходит для использования в сложных условиях, где требуются высокая прочность, ударная вязкость и коррозионная стойкость.

У данного сплава, как и у всех существуют свои достоинства и недостатки, которые приведены ниже.

Преимущества:

- высокое соотношение прочности к весу: титановый сплав ВТЗ-1 обладает высоким соотношением прочности к весу, что означает, что они легкие, но при этом прочные и долговечные. Это особенно важно для медицинских инструментов, которые должны быть просты в обращении и маневрировании во время хирургических процедур, а также быть достаточно прочными, чтобы выдерживать нагрузки при использовании;

- коррозионная стойкость: сплав обладает превосходной коррозионной стойкостью в различных средах, что важно для медицинских инструментов и имплантатов, которые будут подвергаться воздействию жидкостей и тканей организма. Коррозия может вызвать попадание вредных частиц в организм, что приводит к воспалению и повреждению тканей. Использование коррозионностойких материалов, таких как титановые сплавы,

может помочь предотвратить эти проблемы и обеспечить долговечность и эффективность медицинских устройств;

- биосовместимость: титановый сплав ВТЗ-1 является биосовместимым и часто используется в суставных имплантатах, зубных имплантатах и хирургических инструментах;

- хорошая свариваемость: сплав может быть легко сварен с использованием различных методов сварки, включая газовую вольфрамовую дуговую сварку и электронно-лучевую сварку.

Недостатки:

- высокая стоимость: титановый сплав ВТЗ-1 дороже многих других металлов и сплавов, что может сделать его непривлекательным;

- труднообрабатываемый: сплав трудно поддается механической обработке из-за его высокой прочности и твердости, что может привести к повышенному износу инструмента и снижению скорости обработки;

- низкая теплопроводность: титановый сплав ВТЗ-1 обладает низкой теплопроводностью, что может затруднить отвод тепла при высоких температурах;

- подвержен водородному охрупчиванию: сплав подвержен водородному охрупчиванию, которое может произойти, когда сплав вступает в контакт с водородом при высоких температурах и давлениях.

В целом, сплав ВТЗ-1 является высокоэффективным материалом, который хорошо подходит для использования в сложных условиях, где требуются высокая прочность, ударная вязкость и коррозионная стойкость. [8]

Исходя из изученной научной литературы, можно сделать вывод, что титановый сплав ВТЗ-1 действительно актуальный материал не только для машиностроительной промышленности, но и для медицины. Применение его в ультразвуковых технологиях приносит только пользу, и всё же без обработки насадок – волноводов обойтись нельзя, так как со временем они приходят не в пригодность. В следующей главе будут рассмотрены причины разрушений и методы их предотвращения.

2 Анализ причин разрушения волноводов из титанового сплава ВТЗ-1

2.1 Классификация типов разрушения материалов в условиях высокочастотных вибраций

Разрушение волноводов из титанового сплава в хирургических инструментах может быть вызвано несколькими факторами, включая механическое напряжение, термическое напряжение и коррозию.

– во время использования хирургического инструмента может возникнуть механическое напряжение, особенно если инструмент используется в условиях повышенной нагрузки или при неправильном обращении с ним. Это может привести к изгибу или деформации волновода, что может привести к образованию трещин или разломов и в конечном итоге привести к выходу из строя;

– тепловой стресс может возникнуть из-за использования высокоэнергетических ультразвуковых волн или других источников тепла во время хирургической процедуры. Это может привести к расширению и сжатию материала волновода, что может привести к деформации и растрескиванию;

– коррозия также может привести к разрушению волноводов из титанового сплава. Коррозия может возникнуть из-за воздействия жидкостей организма, чистящих средств или других химических веществ. Это может привести к изъязвлению или другому повреждению материала волновода, что может ослабить его и в конечном итоге привести к выходу из строя;[18]

– кроме того, качество материала из титанового сплава и производственный процесс также могут играть определенную роль в долговечности и устойчивости волновода к повреждениям. Важно тщательно подбирать высококачественные материалы и использовать надлежащие технологии производства, чтобы свести к минимуму риск поломки;

– другой причиной является усталостное разрушение. Усталостное разрушение возникает, когда материал подвергается повторяющимся циклам напряжений, что может привести к образованию небольших трещин, которые со временем могут увеличиваться. Это может усугубляться такими факторами, как высокая вибрация, высокая температура и воздействие агрессивных сред.[18]

В 2022 году выпускник Ягодко Д.О. в своей выпускной квалификационной работе провел анализ причин разрушения волноводов из титанового сплава ВТЗ-1. В результате которого, установил, что основными причинами разрушения являются многоцикловая усталостная нагрузка, а разрушение волноводов зарождается от внутренних дефектов материала или от геометрических концентраторов напряжений, обусловленных конструкцией волновода. На рисунке 10 изображены три типа причин и мест разрушения. [Ягодко Д.О. Анализ причин отказов ультразвуковых колебательных систем на базе магнитострикторов и волноводов из титанового сплава ВТЗ-1 2022-34с.]



Рисунок 10 – Виды разрушения УЗК системы

2.2 Анализ и исследование механизмов разрушения ультразвукового волновода хирургического инструмента

На рисунке 11 представлено фото волновода, изготовленного из титанового сплава ВТЗ-1, и разрушенного в результате испытания ультразвукового хирургического инструмента. На фото изображено два последовательно образовавшихся разлома.



Рисунок 11 - Общий вид разрушенного волновода

Анализ макро- и микростроения изломов (рис. 6) показал, что в данном случае имеет место усталостное разрушения волновода. Установить очередность образования изломов 1 и 2 не представляется возможным.

Однако, можно предположить, что при формировании излома 1 первой образовалась усталостная трещина в левой части. Изделие с данной трещиной работало достаточно долго, т.к. ее длина превысила 80 % длины излома. При этом микрорельеф излома полностью или частично нарушен из-за взаимной ударной нагрузки ответных поверхностей излома. По-видимому, через какое-то время работы волновода с другой (правой) стороны волновода зародилась и стала распространяться другая усталостная трещина. Достигнув длины чуть больше 0.5 мм она соединилась с первой трещиной, что и привело к окончательному разрушению волновода в месте излома 1.

Как и в предыдущем случае, излом 2 образовался путем зарождения двух усталостных трещин с разных концов волновода. Причем трещины образовались на разном уровне. По-видимому, левая трещина образовалась несколько раньше, чем правая, т.к. она более длинная и имеет нарушенный

микрорельеф в очаге разрушения (следовательно, дольше испытывала нагрузки). Развиваясь одновременно, данные трещины соединились, недалеко от центра излома, что также привело к окончательному разрушению волновода в месте излома 2.

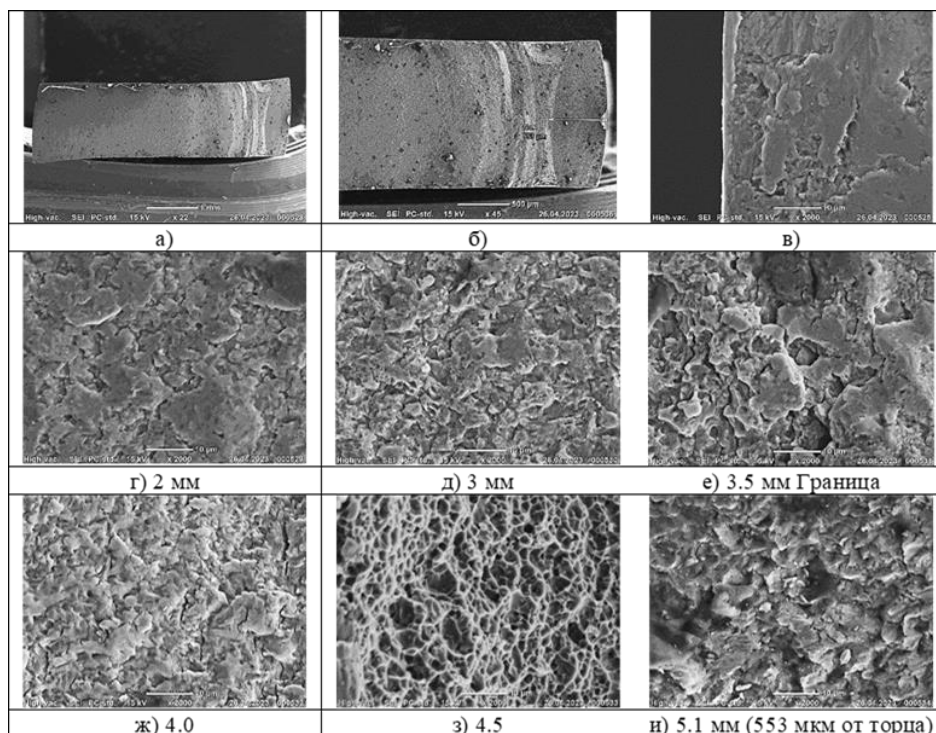


Рисунок 12 - Общий вид (а) и правая часть (б) излома 1, а также микрорельеф излома в очаге разрушения (в), на расстоянии от левого торца излома 2 мм (г), 3.0 мм (д), 3.5 мм (е), 4.0 мм (ж), 4.5 мм (з), 5.05 мм (и). Направление распространения основной трещины – слева на право. а- x22, б- 45, в-и- x2000

Усталостное разрушение волнопроводов из титанового сплава может быть вызвано повторяющейся циклической нагрузкой, которая может привести к развитию трещин и, в конечном счете, к выходу из строя. Циклическая нагрузка может быть вызвана различными факторами, такими как вибрации, тепловое расширение и сжатие, а также механическое напряжение. Со временем циклическая нагрузка может привести к образованию микроскопических трещин, которые будут расти до тех пор, пока не достигнут критического размера, и в этот момент волновод может выйти из строя. [5]

Рост усталостного разрушения в волноводах из титанового сплава обычно связан с прогрессирующим распространением трещин в материале. Как упоминалось ранее, усталостное разрушение может быть вызвано повторяющейся циклической нагрузкой, которая приводит к развитию небольших трещин в материале. Эти трещины могут увеличиваться со временем при продолжающейся нагрузке, в конечном итоге достигая критического размера, когда материал больше не может выдерживать приложенное напряжение и разрушается.

На скорость распространения трещины влияет множество факторов, включая свойства материала, условия нагружения и окружающую среду, в которой работает волновод. Как правило, скорость роста трещин выше в средах, которые являются более агрессивными или подвержены более высоким температурам или другим формам напряжения.

Усталостное разрушение волноводов из титановых сплавов обычно происходит в три стадии: инициирование, распространение и окончательное разрушение.

На стадии инициирования в материале начинают образовываться небольшие трещины из-за повторяющейся циклической нагрузки. Эти трещины, как правило, микроскопические и могут быть незаметны невооруженным глазом.

На стадии распространения трещины начинают расти и распространяться по материалу в результате продолжающейся циклической нагрузки. На скорость роста трещин влияют различные факторы, включая свойства материала, условия нагружения и окружающую среду, в которой работает волновод.

Наконец, на заключительной стадии разрушения трещина разрастается до критического размера, при котором материал больше не может выдерживать приложенное напряжение и катастрофически разрушается. Это может привести к значительному повреждению волновода и может потребовать его замены.[13]

Таким образом, на основании проведенного анализа можно сделать вывод, что разрушение материала в условиях действия высокочастотной вибрации носит такой же характер, как и при усталостной многоцикловой знакопеременной нагрузке и обусловлено зарождением и развитием трещин в местах действия максимальных напряжений.

2.3 Методы повышения усталостной прочности материалов

Существуют различные методы упрочнения сплавов, включая атмосферное упрочнение, упрочнение твердым раствором и упрочнение при обработке. Дисперсионное упрочнение включает добавление легирующих элементов, которые образуют осадки внутри сплава, которые действуют как барьеры для перемещения дислокаций, тем самым повышая прочность сплава. Упрочнение твердым раствором включает добавление легирующих элементов к основному металлу, которые образуют твердый раствор, повышающий прочность сплава. Упрочнение при обработке включает деформацию сплава с помощью механических процессов, таких как прокатка или ковка, что увеличивает плотность дислокаций в материале и тем самым повышает его прочность.

В основном методы упрочнения поверхности можно разбить на две основные группы:

- упрочнение изделий с изменением химического состава поверхностного слоя и его структуры. Упрочнение осуществляется различными методами химической и термической обработки и на нанесение защитных слоев;
- упрочнение изделий без изменения химического состава, но с изменением структуры. Упрочнение достигается поверхностной закалкой, поверхностной деформацией и другими методами.

В данном исследовании рассматривалась вторая группа упрочнения поверхностного слоя, а именно методы поверхностной пластической деформации, так как они имеют ряд преимуществ.

Поверхностная пластическая деформация является одним из наиболее эффективных методов обработки поверхностного слоя, поскольку она может значительно улучшить механические свойства материала при сохранении его объемных свойств. Этот метод включает в себя подвергание поверхностного слоя материала интенсивной механической деформации, обычно с помощью таких методов, как поверхностная прокатка или дробеструйная обработка. Этот процесс приводит к образованию упрочненного поверхностного слоя с высокой плотностью дислокаций, что может повысить усталостную прочность материала, износостойкость и коррозионную стойкость.

По сравнению с другими методами обработки поверхностного слоя, такими как термическое напыление или гальванопокрытие, поверхностная пластическая деформация имеет ряд преимуществ.

Например:

- он не требует использования дополнительных материалов, что делает его более экологичным и экономичным вариантом;
- это существенно не изменяет химический состав материала, что может помочь сохранить его объемные свойства и снизить риск коррозии или других видов разрушения;
- его можно наносить на широкий спектр материалов, включая металлы, полимеры и керамику;
- он может быть легко интегрирован в существующие производственные процессы, что делает его удобным вариантом для улучшения свойств готовой продукции.

Однако важно отметить, что эффективность поверхностной пластической деформации зависит от конкретного применения и свойств обрабатываемого материала. В некоторых случаях другие методы обработки поверхностного слоя могут быть более подходящими или эффективными.

Поэтому важно тщательно учитывать конкретные требования каждого применения и соответствующим образом выбирать наиболее подходящий метод обработки поверхности.

По характеру контакта инструмента и заготовки различается статическое и динамическое ППД.

Статические методы ППД характеризуются стабильностью формы и размеров очага деформации благодаря стационарному контакту инструмента и заготовки [1, 4].

Накатка – это процесс обработки материалов поверхностным пластическим деформированием при помощи накатывающего инструмента – роликов, зубчатых накатников, плашек. Формообразующей называется накатка резьбы, зубьев шестерен, шлицов на валах, образование шероховатой поверхности на цилиндрических головках гаек, винтов, рукоятках и других деталях машин и приборов. Упрочняющая накатка – холодная поверхностная пластическая деформация валов, осей, втулок, дисков, зубьев зубчатых колёс, плоских деталей, приводящая к повышению усталостной прочности, износостойкости поверхности.

Формообразующая накатка — зубонакатка, образование шероховатой поверхности на цилиндрических головках гаек, винтов, рукоятках и других деталях машин и приборов, накатка резьбы, накатка штрихов на шкалах и т. п.

Упрочняющая накатка — холодная поверхностная пластическая деформация валов, осей, втулок, дисков, зубьев шестерен и др., приводящая к повышению усталостной прочности, износостойкости и других свойств.[27]

Достоинства:

- высокая производительность, в несколько раз большая, чем при обработке резанием,
- низкая шероховатость поверхности резьбы,
- повышенные твердость, прочность и износостойкость поверхностного слоя накатанной резьбы благодаря наклепу,
- повышенная усталостная прочность детали.

Недостатки:

- высокая стоимость инструментов,
- пониженная точность резьбы по сравнению со шлифованием,
- необходимость точного подбора размеров заготовки и инструмента, правильного выбора режима накатки, так как возможно появление перенаклепа, чешуйчатости и отслаивания материала по резьбе.

Алмазное выглаживание — это процесс отделки поверхности, который включает использование алмазных частиц для полировки и выглаживания поверхности материала. Алмазные частицы встраиваются в полировальную подушечку или инструмент, и материал приводится в контакт с поверхностью, покрытой алмазом. Алмазные частицы шлифуют поверхность материала, удаляя любые шероховатости и неровности и оставляя гладкую, отполированную поверхность.

Алмазное сглаживание обычно используется при производстве прецизионных компонентов, таких как оптические линзы, полупроводниковые пластины и медицинские имплантаты. Он также используется в ювелирной промышленности для полировки и отделки бриллиантов и других драгоценных камней. [19]

Преимущества алмазного сглаживания включают в себя:

- высокая точность: позволяет получить очень точную и однородную отделку поверхности с минимальными изменениями в шероховатости или волнистости поверхности;
- высокая твердость: алмаз является одним из самых твердых известных материалов, что означает, что он может эффективно удалять материал с твердых металлов и керамики, не повреждая поверхность;
- долговечность: алмазные инструменты для разглаживания и прокладки имеют длительный срок службы, что означает, что их можно использовать в течение длительного периода времени без необходимости замены;

- универсальность: можно использовать для широкого спектра материалов, включая металлы, керамику, стекло и пластмассы.

К недостаткам алмазного сглаживания относятся:

- высокая стоимость: алмазное шлифование - дорогостоящий процесс, поскольку инструменты и накладки с алмазным покрытием могут быть дорогостоящими в изготовлении и обслуживании;

- трудоемкость: может быть трудоемким процессом, поскольку оно требует нескольких этапов и может занять много времени для достижения желаемой отделки поверхности;

- ограниченная скорость удаления материала: медленный процесс, поскольку при этом материал удаляется с поверхности в очень небольших количествах. Это может быть недостатком, когда необходимо удалить большое количество материала;

- риск повреждения: может быть рискованным процессом, так как при неправильном выполнении оно может привести к повреждению поверхности. Это особенно актуально для деликатных материалов, таких как тонкие листы или хрупкие компоненты.

В целом, алмазное сглаживание является высокоэффективным методом получения высокоточной отделки поверхности, но оно может быть дорогостоящим и отнимать много времени. Он лучше всего подходит для применений, где точность и качество поверхности имеют решающее значение и где затраты и время, затрачиваемые на процесс, могут быть оправданы.

Динамические методы ППД характеризуются прерывистым импульсным внедрением индентора в заготовку. Многочисленные удары, наносимые инструментом по поверхности металла, оставляют на нём большое число локальных пластических деформаций (лунок), которые постепенно покрывают всю обрабатываемую площадь. Очаг деформации образуется в результате периодического внедрения индентора в поверхность материала и зависит от энергии удара и степени перекрытия отпечатков. При этом рисунок поверхности, как правило, состоит из сетки частично либо полностью

перекрывающих друг друга лунок [1]. В качестве материала для инструмента при динамическом ППД используются различные инструментальные стали: углеродистые У10 и 40 У10А; быстрорежущие Р18, Р6АМ5, Р6М5К5, Р9М4К8 и Р9К5; твердосплавные ВК6, ВК8 и ВК10 (при динамическом нагружении с изнашиванием в порядке повышения устойчивости к ударным нагрузкам), а также ВК15, ВК20 и ВК25 (при динамическом нагружении без изнашивания в порядке повышения устойчивости к ударным нагрузкам) [12].

Дробеструйная обработка — это метод подготовки поверхности, который включает в себя нанесение мелких металлических или минеральных частиц с высокой скоростью на поверхность материала.

Цель дробеструйной обработки - уменьшить величину остаточного высокого растягивающего напряжения на поверхности компонентов, повысить их усталостную прочность за счет создания напряжения сжатия и, таким образом, избежать разрушения.

При использовании упрочнения дробеструйной обработкой поток движущейся дроби с высокой скоростью (60-110 м /с) постоянно воздействует на поверхность упрочненной заготовки, вызывая следующие изменения целевой поверхности и поверхностного слоя (0,10-0,85 мм) на протяжении всего процесса циклической деформации:

- Изменена микроструктура;
- Остаточное сжимающее напряжение нагнетается во внешний слой материала из-за неравномерной пластической деформации, а остаточное растягивающее напряжение создается во внутреннем поверхностном слое;
- Изменяется шероховатость внешней поверхности.

Основы технологии дробеструйной обработки.

Различной интенсивности дроби и эффектов обработки поверхности можно достичь путем изменения скорости движения машины и точной настройки размера частиц и формы дроби, используемой в процессе дробеструйной обработки. Для регулирования состояния поверхности после обработки методом дробеструйной обработки и оборудованием используются

три показателя. Размер дроби, форма, скорость работы оборудования и расход потока могут быть настроены индивидуально. Все три этих фактора взаимодействуют друг с другом, создавая различные эффекты обработки и гарантируя желаемую шероховатость поверхности после дробеструйной обработки.

В качестве материалов для дробеструйной обработки обычно используются традиционные компоненты дробеструйной обработки: стальная дробь, алюминиевая дробь, керамический порошок, стальной песок, песок из грецкого ореха, кукурузные початки, стеклянные шарики, полимерный песок, пластиковый песок и широкий спектр других материалов.[26]

Поскольку дробеструйная обработка очищает поверхности лучше и быстрее, чем традиционные методы, вот некоторые из основных преимуществ:

- исключает использование опасных химических веществ;
- обеспечивает более высокую производительность, более широкий выбор абразива и лучшую точность рисунка дробеструйной обработки;
- готовая поверхность свободна от химических отложений, окалины и пыли;
- облегчает образование прочного сцепления между защитным покрытием (цинком, краской или эпоксидной смолой) и обрабатываемой поверхностью;
- помогает обнаруживать поверхностные дефекты.

Хотя дробеструйная обработка является эффективным методом удаления ржавчины, окалины и других поверхностных загрязнений, у нее есть некоторые недостатки, в том числе:

- повреждение поверхности: может привести к появлению шероховатости поверхности, изъязвлений или других дефектов, которые могут повлиять на внешний вид и эксплуатационные характеристики материала;

- потеря материала: может быть особенно проблематично для материалов с тонкими или деликатными поверхностями, поскольку может повлиять на точность их размеров и эксплуатационные характеристики;
- экологические опасности: может привести к образованию пыли, шума и других экологических опасностей, которые могут быть вредны для работников и окружающей среды;
- стоимость: может быть дорогостоящим процессом, особенно для больших или сложных поверхностей.

Дробеструйная обработка наиболее часто используется в аэрокосмической промышленности, автомобилестроении, строительстве, судостроении и железнодорожном транспорте среди многих других. Она используется для удаления ржавчины, краски и других загрязнений с металлических поверхностей. Его также можно использовать для подготовки поверхностей к покраске или нанесению покрытий. В автомобильной промышленности дробеструйная обработка используется для очистки деталей двигателя и панелей кузова.

Ультразвуковая поверхностная пластическая деформация — это процесс, который включает в себя подвергание поверхностного слоя материала интенсивной механической деформации с использованием ультразвуковых волн. Этот процесс может быть использован для улучшения механических свойств материалов, таких как их твердость, прочность и износостойкость. [22] Однако у него также есть некоторые потенциальные преимущества и недостатки, которые описаны ниже:

Преимущества:

- улучшенные механические свойства: может привести к увеличению твердости, прочности и износостойкости материала, что может улучшить его общие механические свойства;
- точный контроль: процессом ультразвуковой поверхностной пластической деформации можно точно управлять, что позволяет создавать специфические особенности и свойства поверхности;

– уменьшенная потребность в термообработке: может быть альтернативой термообработке, которая может быть трудоемкой и дорогостоящей;

– минимальное повреждение поверхности: может быть неразрушающим процессом, который сводит к минимуму повреждение поверхности, позволяя создавать высококачественную отделку поверхности.

Недостатки:

– ограниченная толщина: поверхностная пластическая деформация ультразвуком обычно ограничивается поверхностным слоем материала и может не оказывать существенного влияния на объемные свойства материала;

– ограниченная применимость: процесс ультразвуковой поверхностной пластической деформации может быть применим не ко всем материалам и может быть ограничен определенными типами металлов и сплавов;

– стоимость оборудования: оборудование, необходимое для ультразвуковой поверхностной пластической деформации, может быть дорогостоящим, что может ограничить его использование в определенных областях применения;

– сложность процесса: Процесс ультразвуковой поверхностной пластической деформации может быть сложным и требует специальных знаний и опыта для эффективного осуществления;

– шероховатость поверхности: Ультразвуковая пластическая деформация поверхности может привести к образованию шероховатости поверхности, которая может быть нежелательной в определенных случаях.

Динамические методы поверхностной пластической деформации можно разделить на несколько категорий в зависимости от типа энергии, используемой для деформации поверхности материала. Некоторые общие категории включают:

– ударные методы: они предполагают использование высокоскоростных ударов для деформации поверхности материала, например, при дробеструйной обработке или шаровой обработке;

– ультразвуковые методы: они включают использование высокочастотных механических колебаний для деформации поверхности материала, например, при ультразвуковом упрочнении или ультразвуковой прокатке;

– взрывные методы: они включают использование взрывчатых веществ для деформации поверхности материала, например, при сварке взрывом или формовании взрывом;

– электромагнитные методы: они включают использование электромагнитных полей для деформации поверхности материала, например, при электромагнитном формовании или обработке электромагнитным импульсом.

В целом, динамические методы поверхностной пластической деформации могут быть полезным инструментом для улучшения механических свойств и эксплуатационных характеристик материалов, особенно в тех областях применения, где устойчивость к усталости и долговечность имеют решающее значение.

Анализ методов упрочнения поверхностной деформации дает возможность, сделать вывод, что самый эффективный метод - алмазное выглаживание. Так он имеет большое преимущество, которое описано ниже:

– улучшенное качество поверхности: может улучшить качество поверхности материала путем удаления поверхностных дефектов, таких как царапины, ямки и шероховатость. Это приводит к более гладкой и более равномерной поверхности;

– увеличение твердости поверхности: может увеличить твердость поверхности материала, вызывая сжатие напряжения в поверхностном слое. Это может улучшить износостойкость и усталостную прочность материала;

– уменьшение трения и износа: может уменьшить трение и износ материала путем создания гладкой и полированной поверхности. Это особенно полезно в тех случаях, когда важно низкое трение и износ, например, в подшипниках и шестернях;

– минимальное удаление материала: представляет собой процесс без втулки, который включает в себя минимальное удаление материала, что может быть выгодно для тонких или сложных деталей, которые не могут быть легко обработаны;

– рентабельный: может быть экономически эффективным процессом по сравнению с другими методами отделки поверхности, такими как шлифование или полировка, поскольку она требует минимального оборудования и оснастки.[13]

В целом, алмазная глажка может обеспечить несколько преимуществ с точки зрения качества поверхности, твердости, трения и износа, удаления материала и экономической эффективности.

3 Разработка технологии упрочнения ППД ультразвуковых инструментов из титанового сплава ВТЗ-1

3.1 Методика проведения исследований

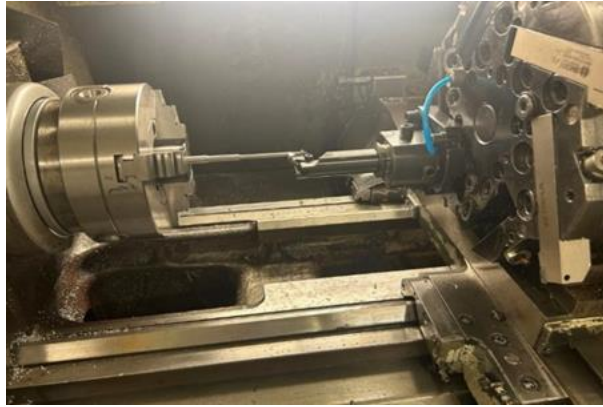
Оборудование, инструмент, образцы и режимы обработки

Экспериментальное исследование эффективности обработки ППД алмазным выглаживанием, в том числе с применением ультразвука, проводили на токарном станке с ЧПУ модели 16Б16Т1С1, оснащенным приспособлением для ультразвуковой и обычной обработки выглаживанием.



Рисунок 13 - Общий вид токарного станка 16П16Т1С1 с ЧПУ, оснащенного устройством для ППД

В револьверной головке станка размещали ультразвуковое устройство с магнитострикционным преобразователем для выглаживания на рисунке 13. Фотография процесса выглаживания волновода представлено на рисунке 14.



а)



б)

Рисунок 14 - Компоновка технологического модуля для обработки выглаживанием на станке с ЧПУ: а) фото компоновки устройства в револьверной головке, б) фото процесса выглаживания цилиндрических поверхностей волновода хирургического инструмента

В качестве инструмента использовались алмазные выглаживатели 1 (ТУ 2-037-100 -84Е, исполнения I, II) со вставками из природного алмаза со сферической рабочей частью радиусом $R=3$ мм, соединенные через резьбу с переходником (рисунок 3.3). Переходник с помощью резьбы закрепляли на рабочем торце концентратора-волновода ультразвуковой головки.

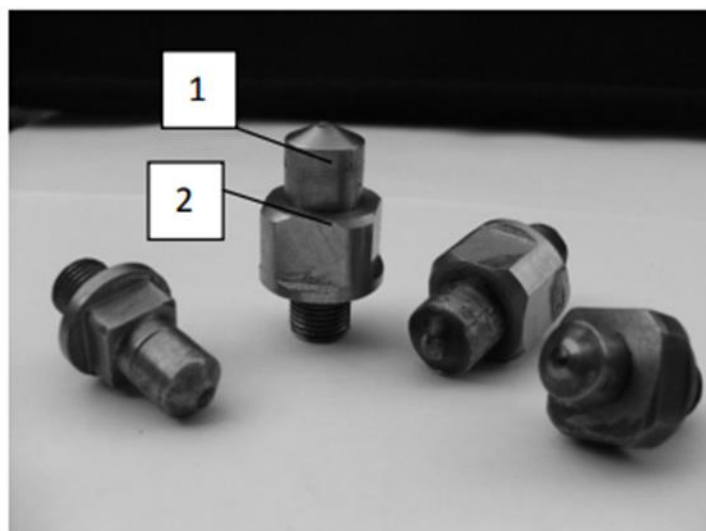


Рисунок 15 – Инструменты для выглаживания: 1 – наконечник из синтетического алмаза АСПК; 2 – переходник для установки в ультразвуковом волноводе

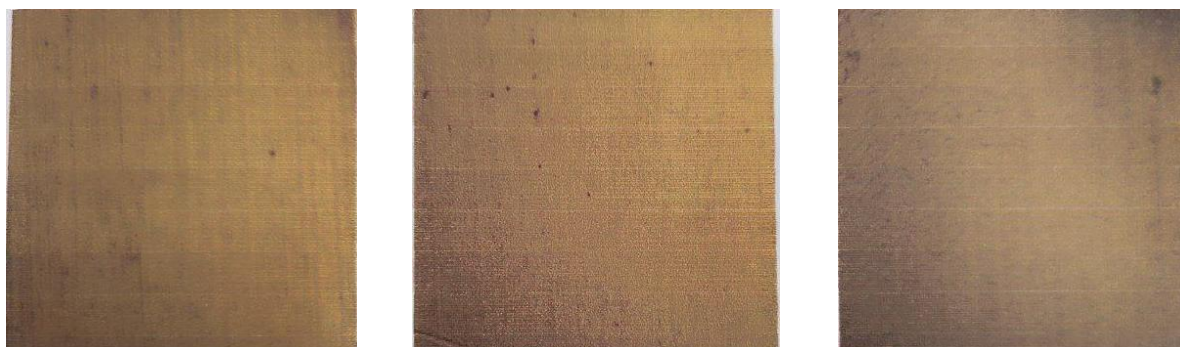
После обработки образцов производили измерение шероховатости поверхности, фотографирование микрорельефа поверхности, измерение микротвердости и анализ микроструктуры поверхностного слоя по стандартным методикам.

3.2 Результаты экспериментального исследования

На рисунке 16 представлены фотографии поверхностей, обработанных точением (а), алмазным сглаживанием без применения узкого (б) и с узким (в). Обработка сглаживанием как с узкими, так и без них проводилась инструментом радиусом $R = 3$ мм в следующих режимах: статическое усиление - 140 Н, подача $s = 0,08$ мм/об, скорость обработки $V = 35$ м/мин.

Из анализа фотографий (рисунок 16) следует, что при обработке выглаживанием с ультразвуком прослеживается формирование определенного микрорельефа, а при выглаживании без ультразвука остаются следы предыдущей обработки. Специфический микрорельеф на обработанной

с ультразвуком поверхности характеризуется специфическим ударным воздействием инструмента на обрабатываемую поверхность (рисунок 17).



a)

б)

в)

Рисунок 16 – Фотографии поверхности после обработки а) точением, б) алмазным сглаживанием без ультразвука, с) алмазным сглаживанием с ультразвуком. X 400



Рисунок 17 - Микрорельеф на поверхности, выглаженной с УЗК, X 800

На рисунке 18 представлены результаты измерения микротвердости по глубине упрочненного слоя после обычной и ультразвуковой обработки выглаживанием.

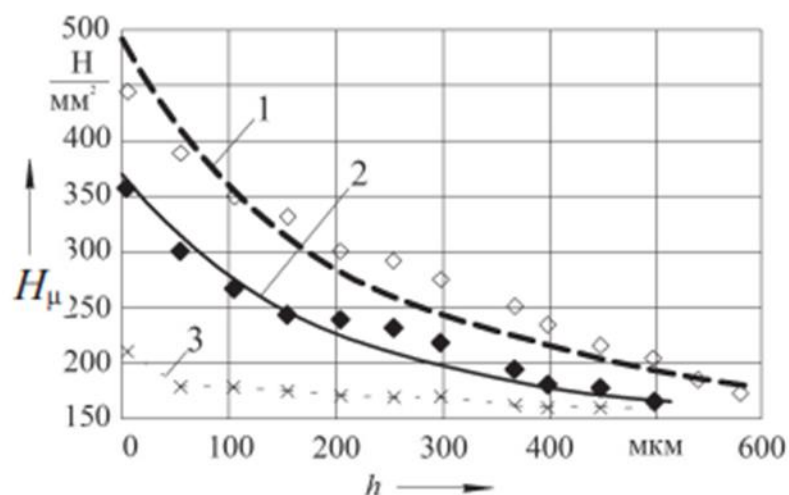


Рисунок 18 - Графики распределения микротвердости по глубине поверхностного слоя после выглаживания: 1 – с ультразвуком; 2 – без ультразвука; 3 – исходная микротвердость

Как видно из графиков микротвердости при обработке выглаживанием с ультразвуком выше по сравнению с выглаживанием без ультразвука. Кроме того, характер изменения микротвердости по глубине поверхностного слоя при ультразвуковом выглаживании отличается от выглаживания без применения ультразвуковых колебаний. При ультразвуковой обработке наблюдается более крутая ветвь аппроксимирующей кривой, характеризующая распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя. Изменение величины микротвердости вглубь поверхностного слоя при ультразвуковой обработке имеет более резкий характер по сравнению со сглаживанием без ультразвука. Это связано со значительной интенсификацией процесса пластической деформации в поверхностном слое и возникновением в нем ряда специфических явлений.

Таким образом, для обработки волноводов для ультразвуковых хирургических систем рационально применять технологию ультразвуковой упрочняющей обработки, которая позволяет обеспечить при сравнительно невысоких значениях усилия обработки необходимое упрочнение поверхностного слоя без искажения геометрии детали.

Заключение

После оценки результатов экспериментальных исследований на основании данных литературного обзора был проведён сравнительный анализ повышения качества поверхностного слоя изделий из титанового сплава ВТЗ-1 классическими методами ППД с технологией алмазного выглаживания. В результате было установлено очевидное преимущество данного метода.

Алмазное выглаживание позволяет минимизировать повреждения и деформации обрабатываемой поверхности. Благодаря высокой твердости алмазов и точной регулировке параметров процесса, можно избежать перегрева и перенапряжения материала, что способствует сохранению его интегритета.

Применение настоящей технологии позволяет улучшить значения шероховатости, микротвёрдости, остаточных сжимающих напряжений и глубины наклёпа.

Для реализации поставленной цели были проведены многосторонние теоретические и экспериментальные исследования по изучению влияния технологии ультразвукового поверхностно-пластического деформирования на состояние поверхностного слоя изделий из титанового сплава ВТЗ-1.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить и проанализировать научную литературу по теме выпускной квалификационной работы;
- провести сравнительный анализ всех методов поверхностной пластической деформации;
- провести и проанализировать эксперимент по упрочнению волновода из титанового сплава ВТЗ-1 с помощью алмазного выглаживания;
- сформулировать технологию по упрочнению волноводов из титанового сплава ВТЗ-1 для ультразвукового хирургического инструмента.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Ковалев К.С., Кунявская Т.М., Конкевич В.Ю., Маркушев М.В. Биорастворимые металлические материалы на основе магния для имплантов // Всероссийский институт легких сплавов. 2012. №4. С. 56-62.
2. Алексеев, С. Г., Макаров, В. Е., Майков, В. Ю. Особенности разработки технологии упрочнения хирургических инструментов из титанового сплава ВТЗ-1 для остеотомы и артропластики // Медицинская техника и технология. - 2010. - Т. 18, № 3. - С. 32-36.
3. Брытков, А.Г., Герман, С.В., Кочкин, Е.А. Упрочнение хирургических инструментов из титанового сплава ВТЗ-1 для остеотомии в детской ортопедии // Ортопедия, травматология и протезирование. - 2014. - № 3 (56). - С. 47-53.
4. ГОСТ 7.0.5-2008 «Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Основные нормы».
5. Григорьев, А. Ю., Скворцов, Г. Г., Дединская, Л. В. Совершенствование технологии изготовления хирургических инструментов из титанового сплава ВТЗ-1 для остеотомии и артропластики // Техника и технология в медицине. - 2018. - № 2 (44). - С. 58-64.
6. Дмитриев, Е. В., Пиголый, О. В., Шалымов, А. С. Усовершенствование технологии упрочнения титановых инструментов для хирургии крупных суставов // Проблемы биомедицинской техники и инженерии. - 2016. - Т. 60, № 4. - С. 62-66.
7. Жаров, В. В. Оптимизация технологии упрочнения хирургических инструментов из титанового сплава ВТЗ-1 для остеотомии и артропластики // Медицинская техника. - 2011. - № 2. - С. 33-38.
8. Забегаева, Н. А., Чуркин, В. А., Михеева, И. В. Совершенствование технологии упрочнения хирургических инструментов из титанового сплава ВТЗ-1 для остеотомии и артропластики // Виртуальный журнал «Вестник новых медицинских технологий». - 2019. - № 3 (26). - С. 97-102.

9. Калашников, А. С., Сеницын, П. А., Черныгина, Е. В. Усовершенствование технологии упрочнения хирургических инструментов из титановых сплавов для остеотомии аппарата Илизарова // Вестник Волжской государственной академии физической культуры, спорта и туризма. - 2017. - № 4 (36). - С. 27-30.

10. Кожин, И. В., Кудрявцев, В. О., Мальцев, Е. Н. Разработка и исследование технологии упрочнения хирургических инструментов из титанового сплава ВТЗ-1 для остеотомии и артропластики // Современные технологии в медицине. - 2015. - Т. 7, № 1. - С. 32-36.

11. Лозовский, В. И., Уголев, В. И., Ходачков, В. И. Разработка технологии упрочнения хирургических инструментов из титанового сплава ВТЗ-1 для остеотомии и артропластики // Материалы VI Международной конференции «Современные медицинские технологии и продукты питания». - 2012. - С. 136-140.

12. Мануйло, И. А., Градусов, Е. Г., Бедурка, Е. А. Исследование возможностей упрочнения хирургических инструментов из титанового сплава ВТЗ-1 для остеотомии и артропластики // Медицинские технологии. - 2014. - № 2. - С. 45-50.

13. Михайлов, А. В., Поляков, А. М., Кузьмин, В. Н. Оптимизация технологии производства упрочненных хирургических инструментов из титановых сплавов для остеотомии и артропластики // Материалы VII Всероссийской конференции «Приборы и методики медицинской диагностики». - 2016. - С. 256-262.

14. Нехай, А. В., Рясин, Д. А., Соловьев, В. С. Совершенствование технологии упрочнения хирургических инструментов из титанового сплава ВТЗ-1 для остеотомии и артропластики // Техническая механика. - 2018. - Т. 63, № 1. - С. 28-34.

15. Овчинников, В. П., Морозов, А. В., Мухамедшин, М. А. Исследование влияния технологии упрочнения на свойства хирургических инструментов из титанового сплава ВТЗ-1 для остеотомии и артропластики //

Вестник Ивановского государственного университета. - 2013. - Т. 3, № 2 (3). - С. 36-41.

16. Папикян, А. О., Яранская, Н. В., Абдуллаев, А. А. Разработка технологии упрочнения хирургических инструментов из титанового сплава ВТЗ-1 для остеотомии и артропластики // Технические науки в Уральском федеральном округе. - 2015. - № 2 (18). - С. 70-75.

17. Ригер, В. А., Иванов, С. В., Карпов, И. В. Упрочнение хирургических инструментов из титанового сплава ВТЗ-1 для остеотомии и артропластики // Медицинский журнал «Сибирский медицинский журнал». - 2011. - № 2. - С. 27-32.

18. Толянский, А. Г., Рымарь, А. К., Киселева, О. А. Совершенствование технологии производства упрочненных хирургических инструментов из титановых сплавов для остеотомии и артропластики // Ортопедия, травматология и протезирование. - 2017. - № 3 (68). - С. 100-105.

19. Федоров, В. И., Громько, А. Э., Потапов, И. И. Оптимизация технологии производства упрочненных хирургических инструментов из титановых сплавов для остеотомии и артропластики // Материалы VIII Международной конференции «Медицина будущего». - 2018. - С. 157-162.

20. Чуватков, А. В., Смольская, Е. О., Громовая, Е. В. Разработка технологии упрочнения хирургических инструментов из титанового сплава ВТЗ-1 для остеотомии и артропластики // Медицинские технологии. - 2015. - № 2. - С. 41-47.

21. Якуш, Б. В., Панкратова, Л. А., Матковский, С. А. Совершенствование технологии упрочнения хирургических инструментов из титанового сплава ВТЗ-1 для остеотомии и артропластики // Техника и технология в медицине. - 2016. - № 1 (39). - С. 56-61.

22. Федосеев С.Н. Металлографический микроскоп // Юргинского технологического института (филиала) Томского политехнического университета. 2012. С. 15.

23. S. Periyannan; P. Rajagopal; K. Balasubramaniam (2015) Robust Ultrasonic Waveguide Based Distributed Temperature Sensing [Text] *Physics Procedia* 70, 514-518
24. 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
25. 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
26. A. Ramkumar; A. Lal. (2012) *Microscale ultrasonic sensors and actuators* [Text] Woodhead Publishing 18, 572–618
27. G.V. Klevtsov, R.Z. Valiev, I.P. Semenova, N.A. Klevtsova, V.A. Danilov, M.L. Linderov, S.V. Zasytkin. Influence of Ultrafine-Grained Structure on the Kinetics and Fatigue Failure Mechanism of VT6 Titanium Alloy // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2019, Vol. 60, No. 3, pp. 253–258