

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 Влияние равноканального углового прессования на кинетику  
усталостного разрушения магниевого сплава

Студент

Я.К. Гулаёзова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Д.т.н., профессор, Г.В.Клевцов

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

Тольятти 2022

## Аннотация

Цель выпускной квалификационной работы - продление срока службы имплантантов из магниевых сплавов путем обработки равноканальным угловым прессованием.

При выполнении работы получены образцы сплава Mg6Al по механизму равноканального углового прессования. Исследованы характеристики полученных образцов - твердость, прочность, пластичность. Выполнено изучение микроструктуры образцов. При испытании образцов по механизму усталостного разрушения применили схему трехточечного изгиба.

Результаты проведенных исследований дают возможность сделать вывод о том, что равноканальное угловое прессование увеличивает прочность и твердость сплава Mg6Al. Размер зерен уменьшается от 85 мкм до 20 мкм.

Выпускная квалификационная работа включает в свой состав пояснительную записку на 40 страницах, рисунки, общим количеством 38, и таблицы в количестве 3.

## **Abstract**

The purpose of the final qualification work is to extend the service life of magnesium alloy implants by processing with equal-channel angular pressing.

When performing the work, samples of Mg6Al alloy were obtained by the mechanism of equal-channel angular pressing. The characteristics of the obtained samples - hardness, strength, plasticity - are investigated. The microstructure of the samples was studied. When testing samples by the fatigue failure mechanism, a three-point bending scheme was used.

The results of the conducted studies make it possible to conclude that equal-channel angular pressing increases the strength and hardness of the Mg6Al alloy. The grain size decreases from 85 microns to 20 microns.

The final qualifying work includes an explanatory note on 40 pages, drawings, a total of 38, and tables in the amount of 3.

## Содержание

Введение.....	5
1 Аналитический обзор. Кинетика и механизм усталостного разрушения металлических материалов.....	7
1.1 Основные понятия и параметры усталостного нагружения.....	7
1.2 Зарождение и распространение усталостной трещины.....	11
1.3. Стадийность усталостного разрушения и строение усталостных изломов .....	13
1.4 Наноструктурирование материалов путем интенсивной пластической деформации .....	18
1.5 Задачи работы .....	23
2 Материал и методики исследования .....	24
2.1 Исследуемый материал.....	24
2.2 Методики механических испытаний.....	25
3 Результаты исследования .....	28
3.1 Структура и механические свойства при растяжении магниевого сплава Mg6Al после гомогенизации и после РКУП.....	28
3.2 Влияние РКУП на время до зарождения усталостной трещины при различных напряжениях цикла .....	29
3.3 Влияние РКУП на строение усталостных изломов .....	33
Заключение .....	37
Список используемой литературы и используемых источников.....	39

## Введение

Несмотря на пристальное внимание ученых проблемы усталостного разрушения до конца не изучены. Выделяют четыре стадии усталостного разрушения [1]. Усталостное разрушение включает в себя стадии образования полосовых субструктур, зарождения и развития микротрещин, последующим перерождением микротрещин в макротрещины и распространением макротрещин в объеме металла.

Усталостное разрушение имеет место при переменных нагрузках на эксплуатируемые детали машин. Большинство деталей современных машин работает в условиях переменных нагрузок. В некоторых случаях и корпусные детали испытывают воздействие переменных нагрузок.

Что касается сплавов магния, то в машиностроении их используют редко. Новым, перспективным направлением использования сплавов магния является использование в качестве биоразлагаемых металлических материалов. Подобного рода материалы нашли применение в качестве ортопедических имплантантов. Использование традиционно применяемых нержавеющей стали и титана требует повторной операции по извлечению имплантанта. Кроме того, сплавы магния обладают хорошей биосовместимостью, магний играет важную роль в энергетическом обмене.

Однако механические характеристики сплавов магния существенно ниже, чем титана и нержавеющей стали. Кроме того, в физиологических условиях человеческого организма магний обладает таким свойством как неравномерная деградация. К тому же при ходьбе, например, имплантанты испытывают знакопеременные нагрузки. Это может способствовать перелому имплантантов до окончания срока полного восстановления кости. Начало применения сплавов магния в качестве фиксирующих имплантантов было еще в начале XX века. Но значительная скорость коррозии и процессы отторжения имплантанта потребовали поиска новых систем легирования магниевых сплавов. За

последние годы удалось создать сплавы на основе магния совместимые с организмом человека. Однако коррозия сплавов характеризуется неравномерностью, к тому же работа имплантатов в человеческом организме характеризуется знакопеременными нагрузками.

Можно для продления срока службы применить технологии равноканального углового прессования. Данная технология обработки материалов позволяет получать высокоплотные наноструктурированные металлы. Причем для обрабатываемых металлов характерным моментом является высокая однородность зерна. Уменьшение размеров зерен при равноканальном угловом прессовании может увеличить такие механические характеристики металла как предел текучести и прочности.

С учетом вышеизложенного, можно сформулировать следующую цель работы: продление срока службы имплантатов из магниевых сплавов путем обработки равноканальным угловым прессованием.

# 1 Аналитический обзор. Кинетика и механизм усталостного разрушения металлических материалов

## 1.1 Основные понятия и параметры усталостного нагружения

Усталостное разрушение по механизму действия отличается от разрушения при однократном разрушении. В первую очередь при переменных нагрузках накапливаются локальные повреждения. Со временем они перерастают в микротрещины. Микротрещины по мере роста объединяются, и превращаются в макроскопические трещины. Рост макроскопической трещины зависит от величины напряжений в ее устье [11].

Цикл нагружения – это совокупность последовательных значений переменных напряжений за один период их изменения.

К параметрами цикла нагружения можно отнести, рисунок 1:

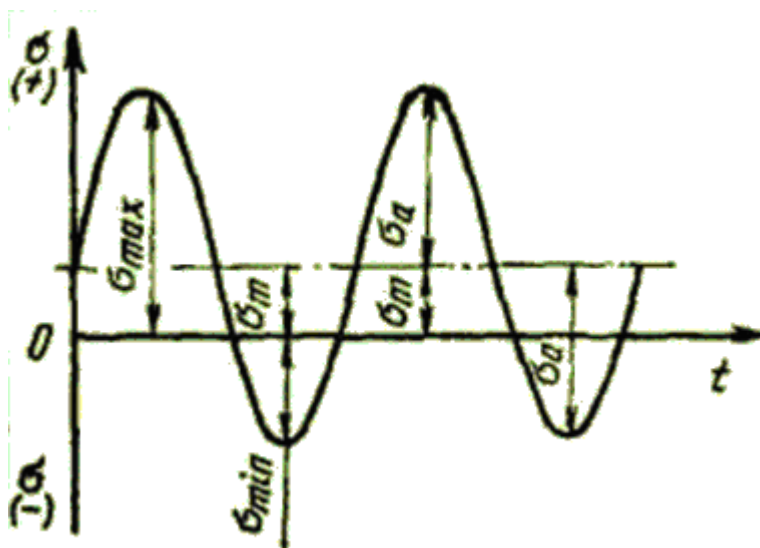


Рисунок 1 – Параметры цикла нагружения

- максимальное ( $\sigma_{max}$ ) и минимальное ( $\sigma_{min}$ ) значения напряжения цикла.
- размах напряжения цикла:  $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ .

- амплитуда напряжения:  $\sigma_a = 0,5(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$ .
- среднее напряжение цикла:  $\sigma_m = 0,5(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})$ .
- коэффициент асимметрии цикла нагружения:  $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ .
- частота и период нагружения:  $f = 1/T$ .

Цикл нагружения может быть симметричным, рисунок 2 г. Однако не всегда коэффициент асимметрии принимает значения -1.

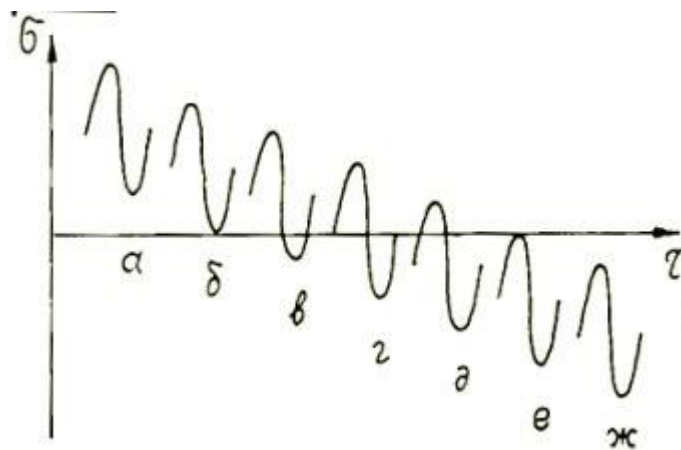


Рисунок 2 – Виды циклов нагружения

Возможен вариант при котором максимальное и минимальное напряжения цикла положительны, рисунок 2 а. При этом коэффициент асимметрии цикла изменяется в пределах  $0 < R < 1$ . Возможен вариант при котором нижний предел напряжений достигает нуля а верхний положителен, рисунок 2 б. При этом коэффициент асимметрии цикла равен нулю. Если значения по модулю положительных значений напряжений превышают отрицательные, то коэффициент асимметрии меняется в пределах  $1 < R < 0$ . Если значения по модулю отрицательных значений напряжений превышают положительные, рисунок 2 д, то коэффициент асимметрии меняется в пределах  $-\infty < R < -1$ . Возможен вариант при котором верхний предел напряжений достигает нуля а нижний отрицателен, рисунок 2 е. При этом коэффициент асимметрии цикла равен минус бесконечности [1]. Ну и если верхний и нижний предел напряжений цикла отрицательны, деталь работает в условиях



сжимающих напряжений, рисунок 2 ж, при этом коэффициент асимметрии цикла находится в пределах  $-1 < R < 0$  [9].

Циклы 2 б и 2 е называют еще пульсирующими циклами.

Работа имплантантов в человеческом организме скорее происходит в условиях цикла, рисунок 2 е, при условии нахождения имплантанта в ногах [2].

Помимо перечисленных характеристик цикла, они бывают еще разной формы. Вариант строго синусоидальной формы, рисунок 3 а, на практике реализуется редко. В основном такая форма цикла у деталей механизмов при установившемся режиме работы [3].

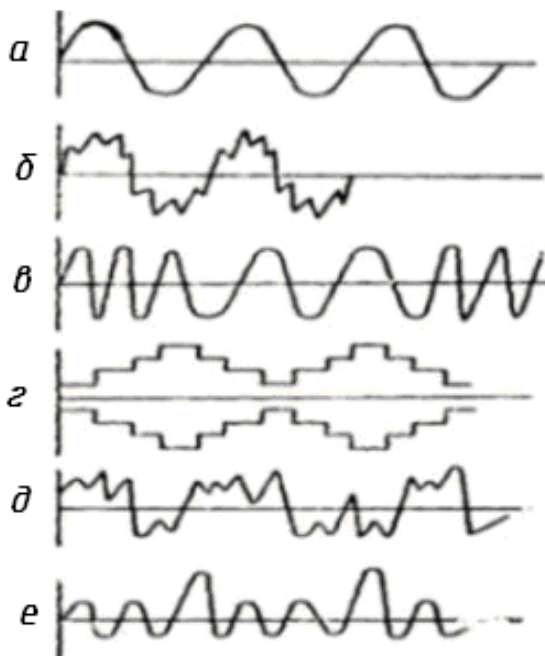


Рисунок 3 – Формы цикла

Форма цикла, изображенная на рисунке 3 б называется бигармонической, на рисунке 3 в форма цикла называется с переменной частотой. Форма цикла на рисунке 3 г – программированный блочный цикл. На рисунке 3 д изображен произвольный цикл. И на рисунке 3 е – цикл называется с перегрузкой в гармоническом цикле. Для имплантантов работающих в человеческом организме подошли бы циклы 3 в и 3 д [8].

Для испытания сплавов магния после равноканального углового прессования возможны два варианта нагружения, мягкое нагружение, и жесткое нагружение. При мягком нагружении задается величина нагрузки. При жестком нагружении задается величина деформации [13].

При мягком нагружении нет ограничения в перемещении исследуемого образца, такой вид испытаний нашел большее применение. При жестком нагружении ограничивают перемещение исследуемого образца.

По результатам испытаний строят т.н. кривые усталости, рисунок 4. Принцип построения кривой усталости заключается в следующем, к образцу прикладывают напряжения  $\sigma_1$ , проводят испытания, он разрушился, допустим через 10000 циклов нагружения, ставится точка 1. Затем нагрузку снижают, получается точка 2, допустим, через 20000 циклов нагружения, испытания продолжают, в точке n напряжения устанавливают  $\sigma_n$ , при этом образец до разрушения проработал 50000 циклов [5].

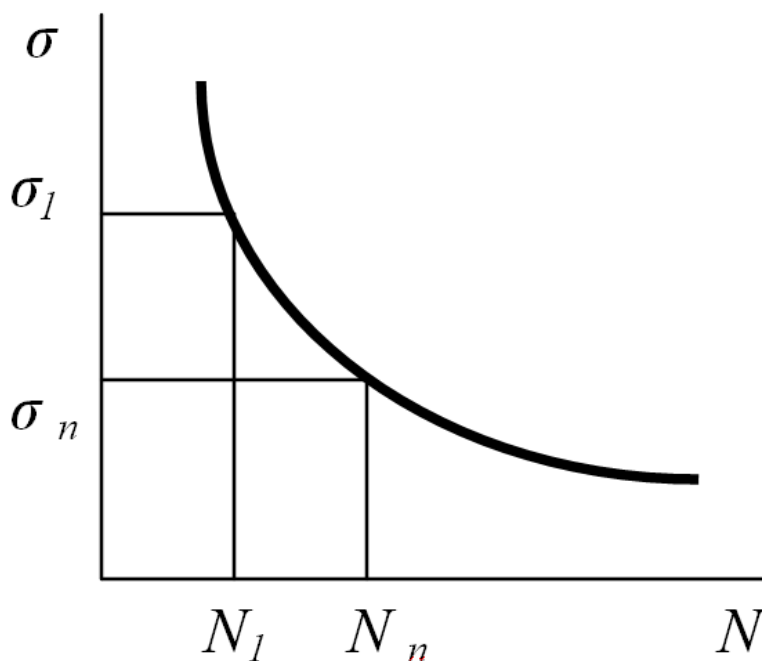


Рисунок 4 – Кривая усталости

Для наглядности Кривую усталости изображают в логарифмических координатах, рисунок 5. На этой кривой наглядно просматривается участок  $\sigma_r$ , т.е. при напряжениях меньших чем  $\sigma_r$  изделие может работать сколь угодно долго. Величина  $\sigma_r$  называется физический предел усталости (выносливости) [4].

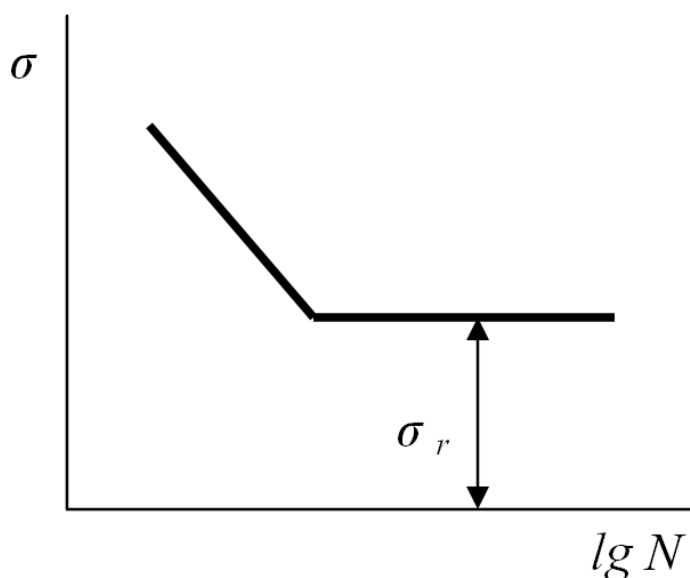


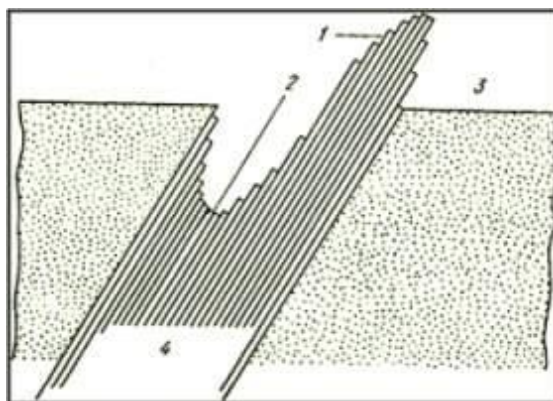
Рисунок 5 – Кривая усталости в логарифмических координатах

Для того, чтобы ограничить число испытаний, ведь это затратная процедура, требуется образцы изготовить, требуется заплатить лаборанту за работу с испытательной машиной, принята база испытаний  $10^7$  циклов [6].

## 1.2 Зарождение и распространение усталостной трещины

Появление микротрещин происходит в местах наибольших значений напряжений от внешних нагрузок. За счет действия переменных нагрузок происходит появление полос локального скольжения. Полосы расположены под углом примерно  $45^\circ$  к направлению приложенного растягивающего усилия. Выпуклости полос локального скольжения называются экструзиями, впадины

интрузиями, рисунок 6. Усталостные микротрещины появляются в границах одного двух зерен. Их пространственная ориентация, также под углом 45° к направлению приложенного растягивающего усилия.



1 – экструзии, 2- интрузии, 3- поверхность материала, 4 – полосы локального скольжения

Рисунок 6 – Схема процесса образования полос локального скольжения

Полосы локального скольжения образуют экструзии и интрузии за счет накопления пластической деформации, рисунок 7.

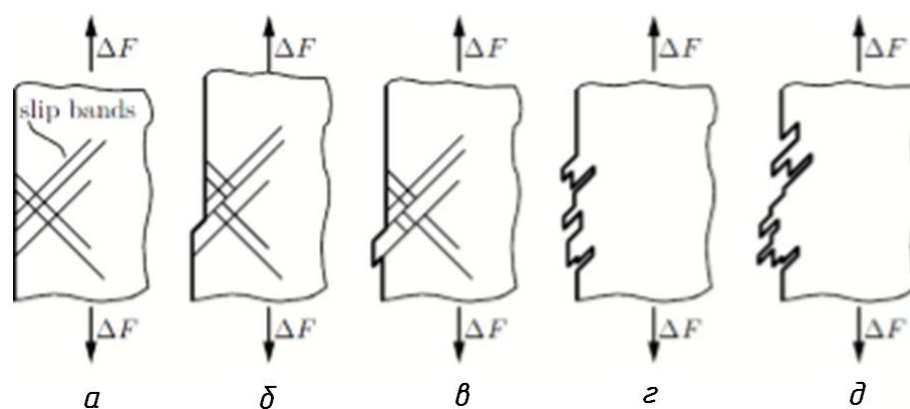


Рисунок 7 – Механизм образования экструзий и интрузий.

Рисунок 7 а показывает что дислокации перемещаются в кристаллографических плоскостях. После чего полосы скольжения приводят к образованию свободной поверхности, рисунок 7 б. Затем следует этап вытягивания или проникновения, рисунок 7 в. И на рисунке 7 г, 7 д показано различное количество разрывов на поверхности [7].

Затем, в процессе распространения, усталостная трещина увеличивается перпендикулярно приложенному усилию.

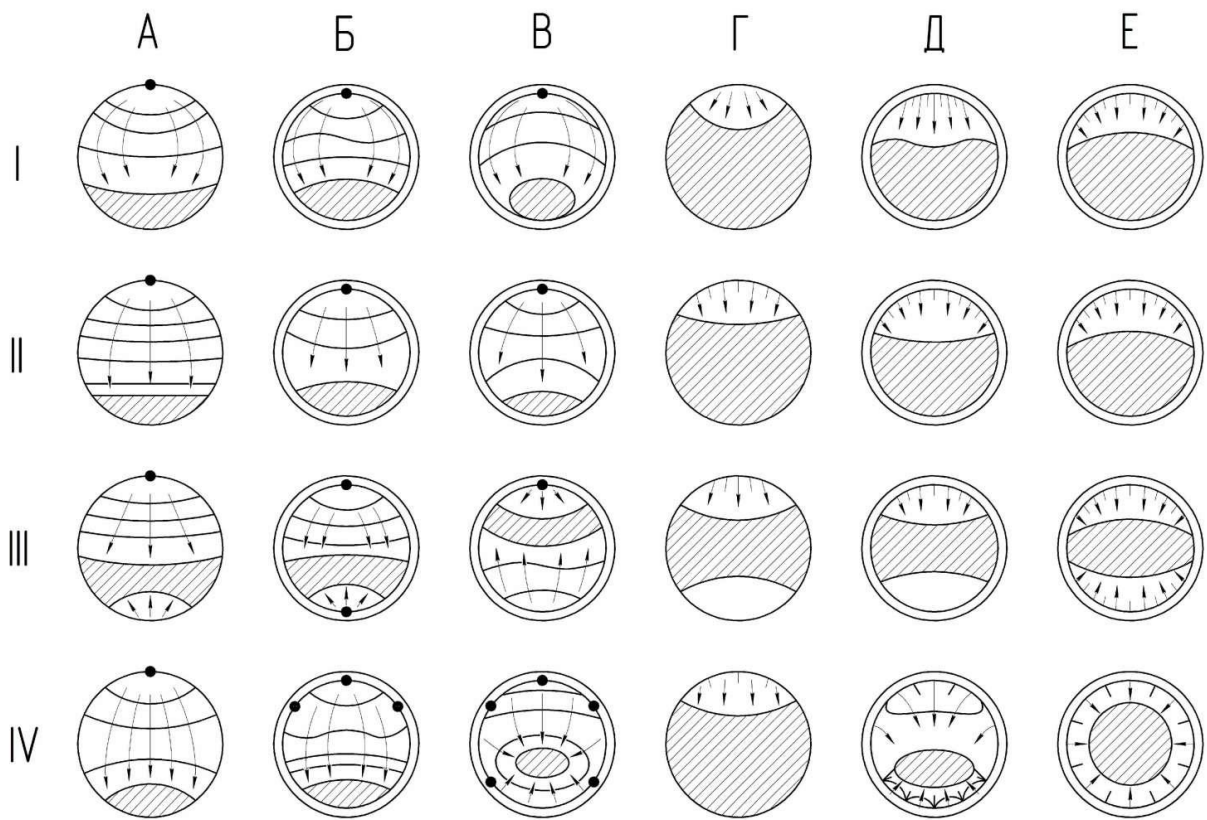
### **1.3. Стадийность усталостного разрушения и строение усталостных изломов**

После разрушения получают, примерно, следующие виды усталостных изломов, рисунок 8.

В процессе распространения усталостной трещины каждый цикл нагружения приводит к тому, что трещина увеличивается [9]. Следствием этого на изломе просматриваются полосы, которые показывают продвижение трещины, рисунок 9.

Геометрические характеристики и общий вид полосок зависит от материала и особенностей нагружения.

Варианты хрупкого разрушения могут быть как внутризеренными так и межзеренными. Характерным для внутризеренного разрушения является распространение трещины вдоль кристаллографических плоскостей, рисунок 13. Данный вариант разрушения характерен для объемцентрированной кристаллической решетки и гексагональноплотноупакованной [11].



I – одноосное растяжение; II – изгиб в одну сторону; III – изгиб в две стороны; IV – изгиб при вращении.

A, Г – локальный концентратор; Б, Д слабый концентратор по окружности; В, Е – глубокий концентратор по окружности

Рисунок 8 – Виды усталостных изломов.

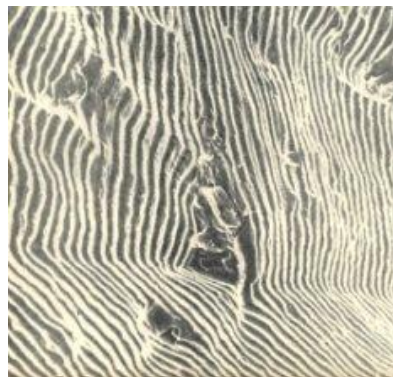


Рисунок 9 – Усталостные полосы

Конечный вид усталостного излома может быть при одном источнике разрушения следующим, рисунок 10.



Рисунок 10 – Усталостный излом при одном источнике разрушения

В некоторых случаях при больших нагрузках могут образовываться несколько трещин, которые впоследствии сливаются, тогда усталостный излом выглядит, примерно так, рисунок 11.



Рисунок 11 – Усталостный излом при больших нагрузках.

Можно классифицировать усталостные разрушения на вязкие, квазихрупкие, хрупкие. При вязком разрушении трещина усталости

распространяется медленно, процесс зарождения трещины и ее распространения требует больших энергетических затрат, рисунок 12.

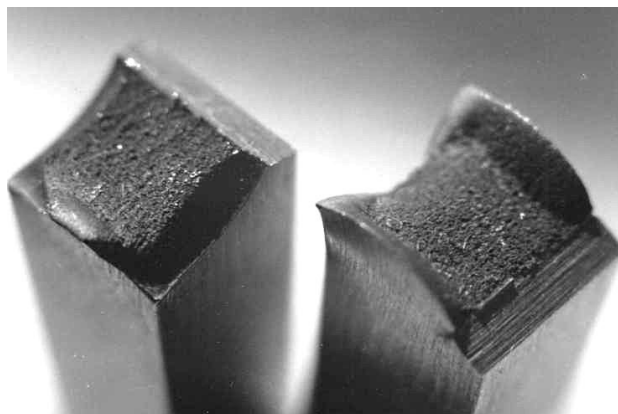


Рисунок 12 – Вязкое разрушение аустенитной стали

Квазихрупкое разрушение характеризуется наличием пластической деформации, однако затраты энергии на зарождение трещины и ее развитие невелики [10].

Хрупкое разрушение представляет наибольшую опасность для деталей и элементов металлоконструкций. Хрупкий излом обычно блестящий, без признаков пластической деформации, рисунок 13.

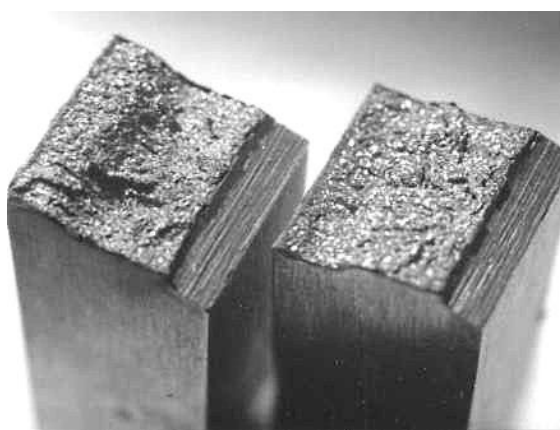


Рисунок 13 – Хрупкое разрушение



При межзеренном разрушении трещина распространяется по поверхности граней зерен, рисунок 15. Или вдоль межфазной поверхности в двухфазных металлах. Данный вариант разрушения характерен для объемноцентрированной кристаллической решетки, гранецентрированной кристаллической решетки и гексагональноплотноупакованной [14].

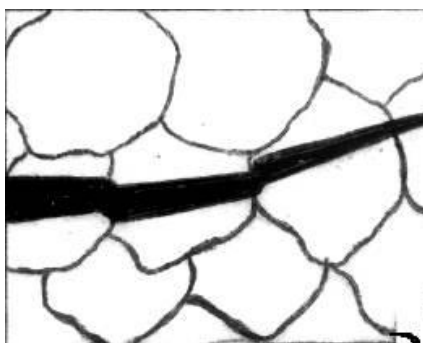


Рисунок 14 – Вариант внутризеренного разрушения

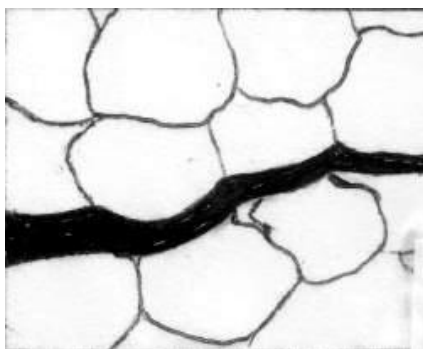


Рисунок 15 – Вариант межзеренного разрушения

Вязкохрупкое разрушение характеризуется наличием на поверхности излома участков вязкого разрушения и участков хрупкого разрушения.

#### 1.4 Наноструктурирование материалов путем интенсивной пластической деформации

При интенсивной пластической деформации получается материал без пор и с размером зерен около 100 нанометров. Технологии интенсивной пластической деформации подразделяются на равноканальное угловое прессование, технологию экструзии через фильеру, обработка металла трением под высоким давлением, технология всесторонней ковки и технологию многократного гофрирования и последующего распрямления [12].

При равноканальном угловом прессовании возможны три варианта. Ориентация заготовки остается неизменной после каждого прохода, рисунок 16.

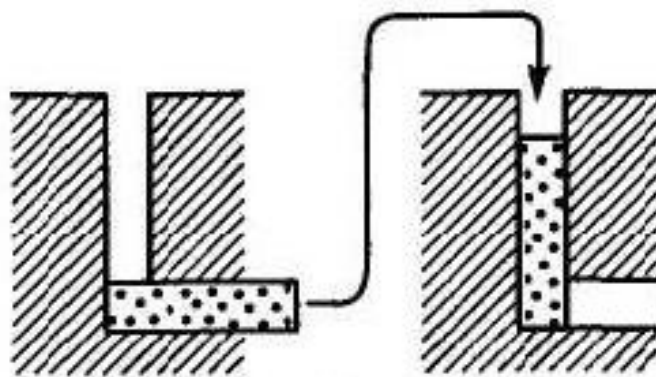


Рисунок 16 – Неизменная ориентация заготовки

Ориентация заготовки меняется на угол  $90^\circ$  после каждого прохода, рисунок 17.

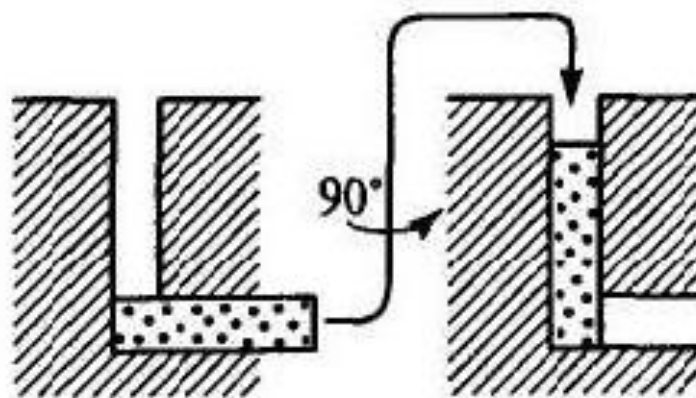


Рисунок 17 – Поворот заготовки на угол  $90^\circ$

Ориентация заготовки меняется на угол  $180^\circ$  после каждого прохода, рисунок 18.

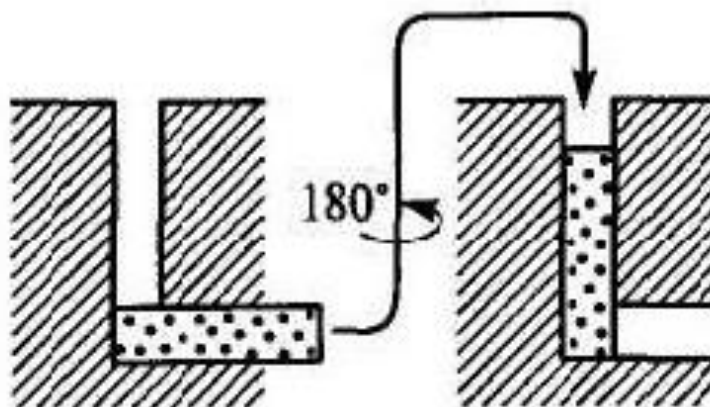


Рисунок 18 – Поворот заготовки на угол  $180^\circ$

Другой вариант интенсивной пластической деформации – продавливание металла через фильеру, рисунок 19.

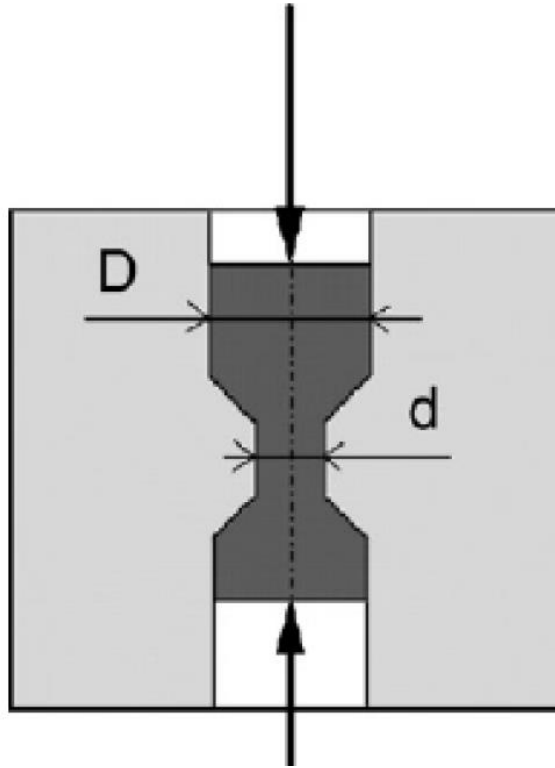


Рисунок 19 – Продавливание металла через фильеру

Вариант обработки металла трением под высоким давлением. Исследуемый образец (Sample) устанавливают между верхним штампом (Upper Die) и нижним штампом (Lower Die), рисунок 20. Образец сдавливают.

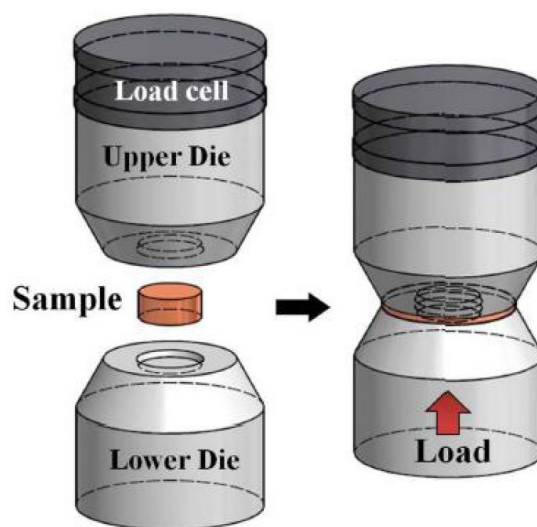


Рисунок 20 – Установка образца

Затем начинается вращение нижнего штампа, и образец начинает деформироваться сдвигом, рисунок 21.

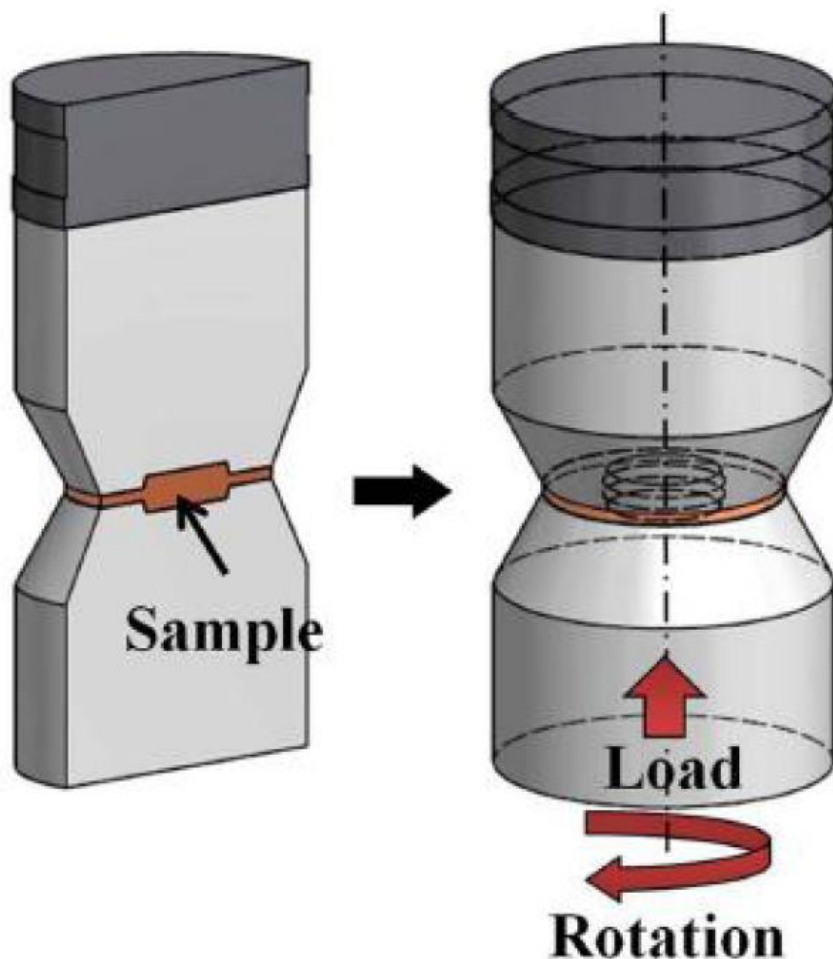


Рисунок 21 – Вращение образца

Измельчение структуры начинается уже после оборота на  $180^\circ$ . Однако для создания однородной наноструктуры требуется несколько оборотов [15].

Метод характеризуется ограничением по геометрии, диаметр получаемых образцов до 20 мм, при толщине 0,2-0,5 мм.

Технология всесторонней ковки подразумевает операции осадки, кантовки, протяжки, рисунок 22.



Рисунок 22 – Последовательность операций всестороннейковки

Характерной особенностью операций последовательнойковки является повышение однородности структуры металла но измельчения структуры не происходит, при неизменных температуре процесса и скорости деформирования. Если снижать температуру при которой металл деформируется, то возможно измельчение структуры [16].

Еще один вариант измельчения структуры и повышения ее однородности является вариант многократного гофрирования расправления, рисунок 23. Способ получения ультрадисперсного продукта, включает в себя следующие этапы: а) изгиб заготовки из металла или сплава, имеющей противоположные, по существу плоские поверхности, в гофрированную форму; б) прикладывание усилий к гофрированной заготовке, достаточных для существенного восстановления плоских поверхностей и получения более мелкозернистой заготовки; повторять этапы (а) и (б) до тех пор, пока заготовка не превратится в ультрадисперсное изделие с улучшенным размером зерна и повышенной прочностью.

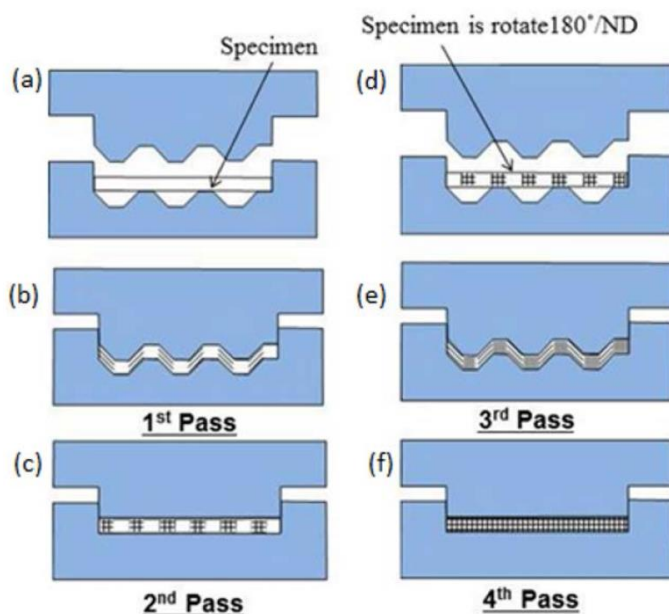


Рисунок 23 – Технология многократного гофрирования распрямления

Перечисленные варианты технологических процессов получения ультрамелкозернистой структуры позволяют выбрать для дальнейшей работы технологию равноканального углового прессования.

### 1.5 Задачи работы

В работе поставлена цель: продление срока службы имплантантов из магниевых сплавов путем обработки равноканальным угловым прессованием.

На основании вышеизложенного можно сформулировать задачи выпускной квалификационной работы, решая которые, поставленная цель будет достигнута:

- обработать технологией равноканального углового прессования образцы из сплава Mg6Al;
- исследовать механические характеристики данного сплава;
- исследовать усталостную прочность данного сплава;
- исследовать усталостные изломы сплава.

## 2 Материал и методики исследования

### 2.1 Исследуемый материал

В качестве исследуемого материала был выбран широко применяемый в медицине магниевый сплав Mg6Al (5.6 % Al; 0.245 % Mn; 0.047 % Cl; 0.046 % Ca). Сплав исследовали после гомогенизационного отжига и после РКУП. Отжиг сплава в литом состоянии проводили при температуре 430 °С в течение 24 часов в среде аргона с последующей закалкой в воде. После вышеуказанной термической обработки партию сплава подвергали РКУП при температуре 400 °С (n=4, маршрут Вс,  $\varphi = 120^0$ ) [17] с промежуточным нагревом до температуры 400 °С в течение 15 минут перед каждым проходом.

Исследование микроструктуры сплава проводили на металлографическом микроскопе Olimpus GX-5, рисунок 24. Микроскоп обеспечивает работу в отраженном и поляризованном свете. Увеличение микроскоп обеспечивает от 25х до 1500х.



Рисунок 24 – Микроскоп Olimpus GX-5



## 2.2 Методики механических испытаний

Испытание сплава на твердость проводили на твердомере ТН 300, рисунок 25. Твердомер состоит из следующих основных деталей и узлов, 1 – корпус; 2 – головка индентора; 3 – индентор; 4 – наковальня; 5 – кожух ходового винта; 6 – маховик; 7 – ходовой винт; 8 – нивелирная ножка; 9 – крышка; 10 – задняя панель; 11 – дисплей; 12 – клавиатура; 13 – рукоятка выбора нагрузки.

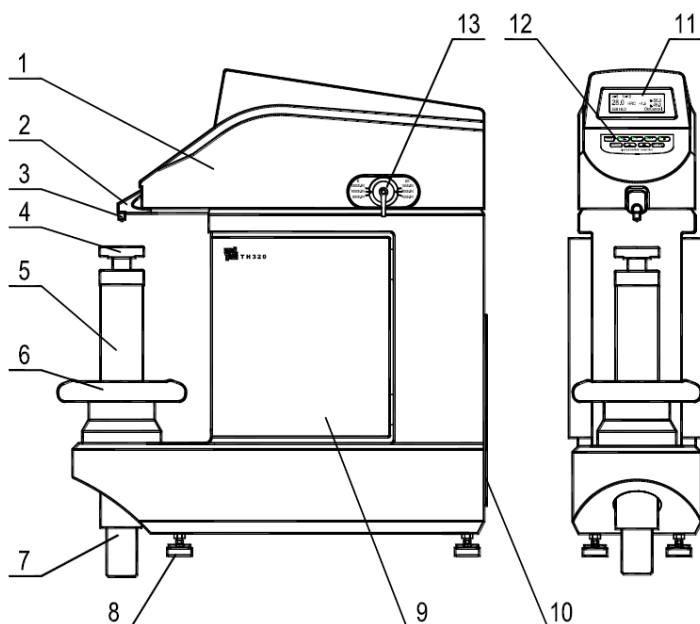


Рисунок 25 - Полуавтоматический стационарный измеритель твердости ТН300 с выводом информации на компьютер

Статическое растяжение цилиндрических образцов диаметром 3 мм при температуре 20 °С проводили на универсальной испытательной машине Н50КТ, рисунок 26. Усталостные испытания призматических образцов толщиной 10 мм, рисунок 27, проводили при температуре 20 °С по схеме трехточечного изгиба, рисунок 28, на установке Instron 8802, рисунок 29, при  $f=10$  Гц,  $R=0.1$ . Образцы испытывали при нагрузках 800 и 1000 н.



Рисунок 26 - Универсальная испытательная машина Н50КТ, с компьютерным управлением предназначена для определения механических свойств материалов



Рисунок 27 – Образец для испытаний магниевого сплава на усталость

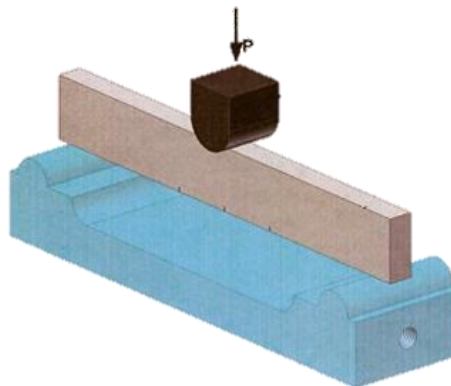


Рисунок 28 – Усталостное испытание образцов по схеме трехточечного изгиба



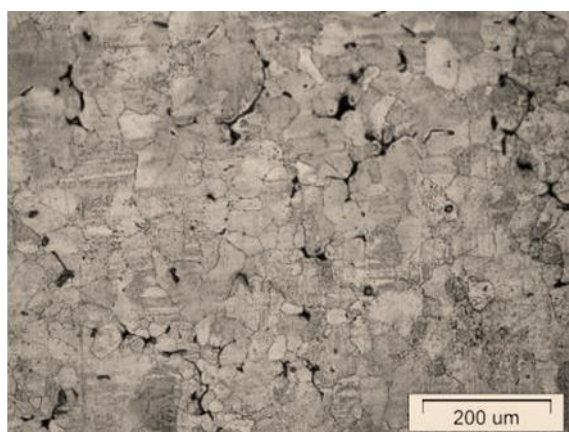
Рисунок 29 – Испытательная установка Instron 8801

### 3 Результаты исследования

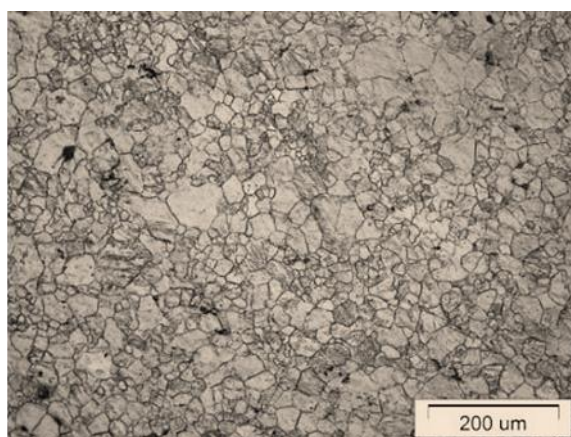
#### 3.1 Структура и механические свойства при растяжении магниевого сплава Mg<sub>6</sub>Al после гомогенизации и после РКУП

Исследование микроструктуры магниевого сплава Mg<sub>6</sub>Al показало<sup>2)</sup>, что средний размер зерен в гомогенизированном состоянии равен 85 мкм; средний размер зерен в сплаве после РКУП – 20 мкм. В гомогенизированном состоянии видна вторая фаза (Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>) по границам зерен, рисунок 30 а. После РКУП данной фазы стало меньше, рисунок 30 б, что говорит о ее частичном растворении в процессе горячей деформации ( $0,73T_{пл}$ ) [20].

После отжига сплав имеет крайне низкую твердость и низкие механические свойства при растяжении, таблица 1. После РКУП твердость, предел прочности и предел текучести возрастают в 1.2-1.3 раза. Относительное удлинение сплава, несмотря на деформационное упрочнение, также возрастают в 1.2 раза.



а)



б)

Рисунок 30 – Микроструктура магниевого сплава Mg<sub>6</sub>Al после гомогенизации (а) и после РКУП (б)

Таблица 1 – Средние значения размера зерна ( $d_{cp}$ ), твердости (НВ), предела прочности ( $\sigma_B$ ), предела текучести ( $\sigma_{0.2}$ ) и относительного удлинения сплава Mg6Al

Состояние	$d_{cp}$ , мкм	НВ	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta$ , %
После отжига	85	48	230±10	75±5.0	8.5±1.5
После РКУП	20	60	260±15	100±10	10±1.0

### 3.2 Влияние РКУП на время до зарождения усталостной трещины при различных напряжениях цикла

На рисунках 31-34 представлены зависимости изменения длины усталостной трещины в зависимости от количества циклов нагружения образцов. По вышеприведенной методике (см. раздел 2.3) было определено количество циклов нагружения до зарождения усталостной трещины (табл. 3.2).

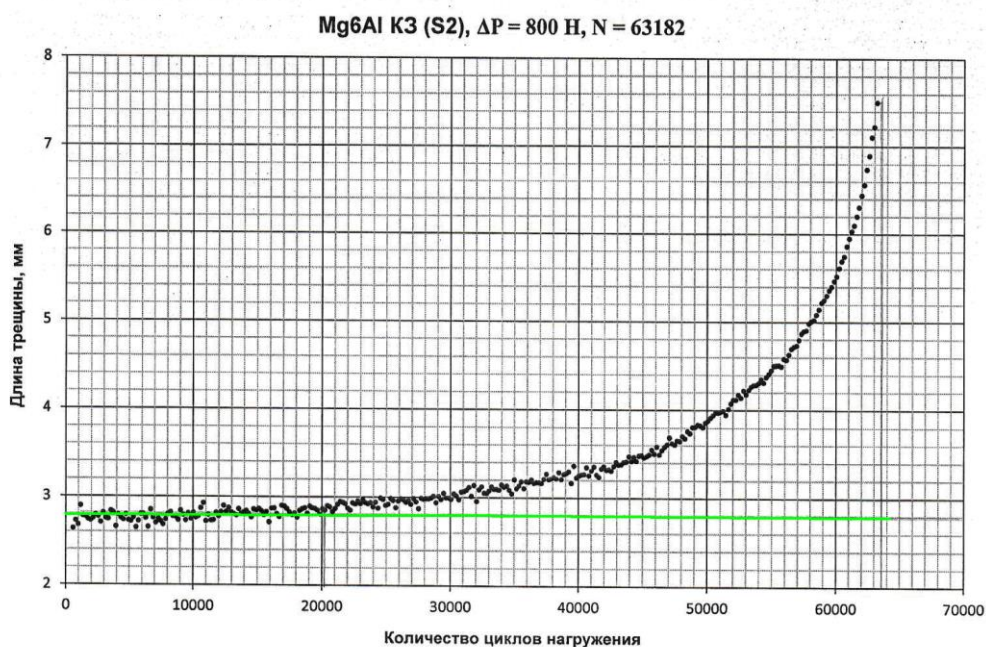


Рисунок 31 – Время до зарождения усталостной трещины, после отжига при нагрузке 800Н

Mg6Al K3 (S3),  $\Delta P = 1000 \text{ Н}$ ,  $N = 42885$

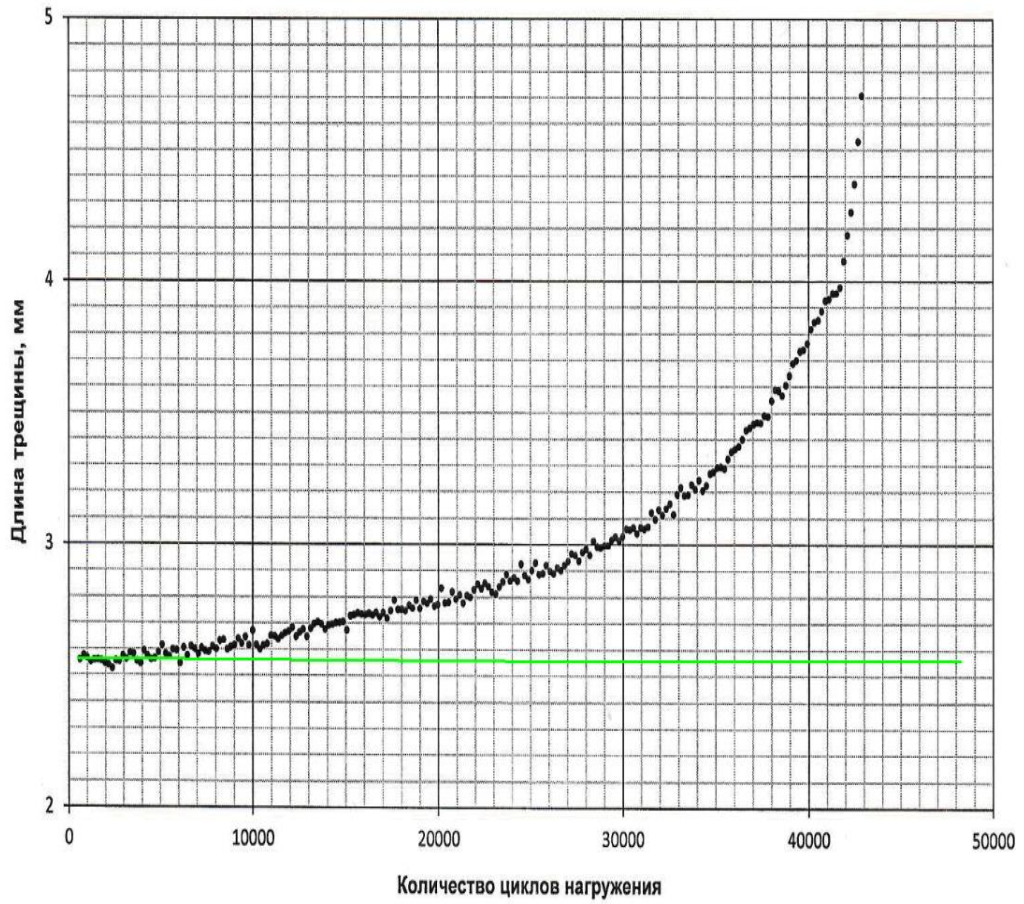


Рисунок 32 – Время до зарождения усталостной трещины, после отжига при нагрузке 1000Н

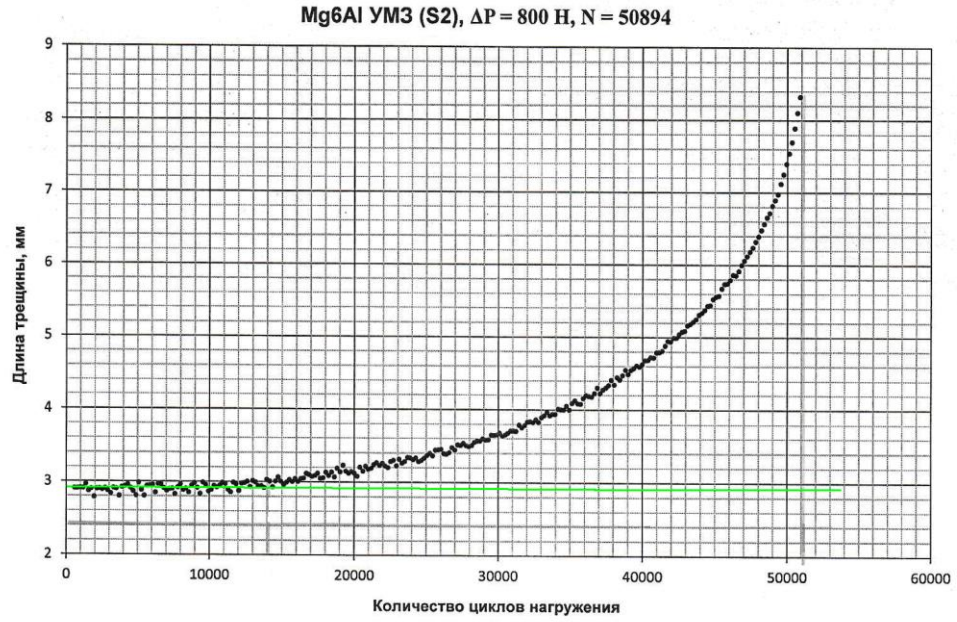


Рисунок 33 – Время до зарождения усталостной трещины, после РКУП  
при нагрузке 800Н

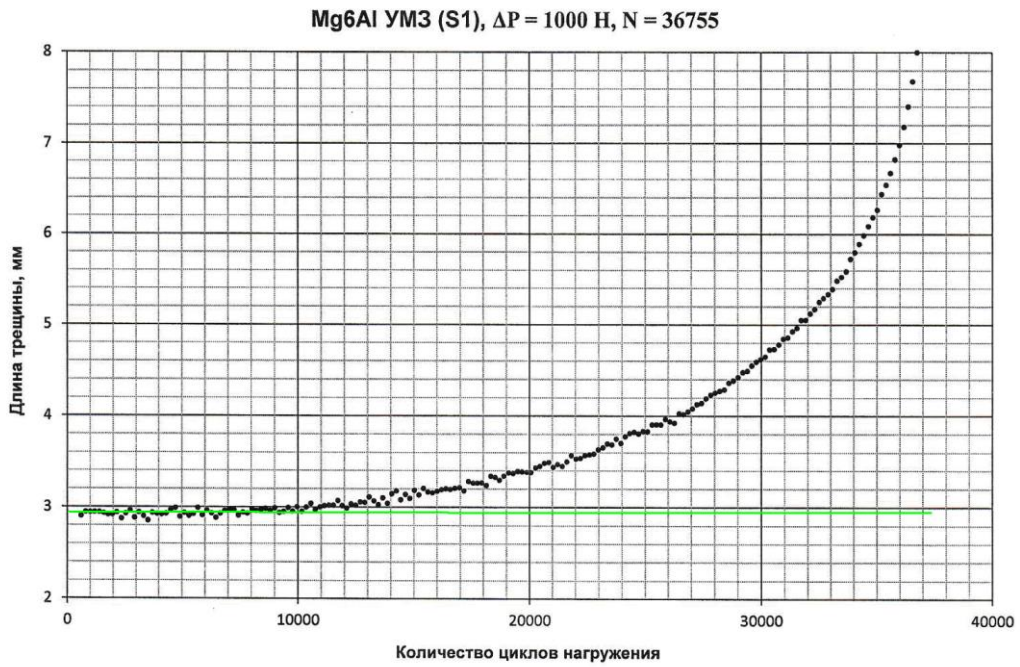


Рисунок 34 – Время до зарождения усталостной трещины, после РКУП  
при нагрузке 1000Н

Таблица 2 – Кинетика усталостного разрушения образцов из магниевого сплава Mg6Al после отжига и после РКУП

Состояние сплава	Количество циклов нагружения	ΔP, Н	
		800	1000
После отжига	N (цикл)	$6.32 \cdot 10^4$	$4.29 \cdot 10^4$
	Nз (цикл)	12000 (19%)	8000 (18%)
После РКУП	N (цикл)	$5.09 \cdot 10^4$	$3.68 \cdot 10^4$
	Nз (цикл)	10000 (20%)	7500 (20%)

На рисунках 35-36 представлены количество циклов до зарождения зависимости изменения длины усталостной трещины в зависимости от общего количества циклов до разрушения образцов. Графики построены согласно приведенной таблице 2 информации. На рисунке 35 представлены данные в двойных логарифмических координатах, согласно приведенным данным, наблюдается линейная зависимость количества циклов до зарождения трещины от общего количества циклов до разрушения [19].

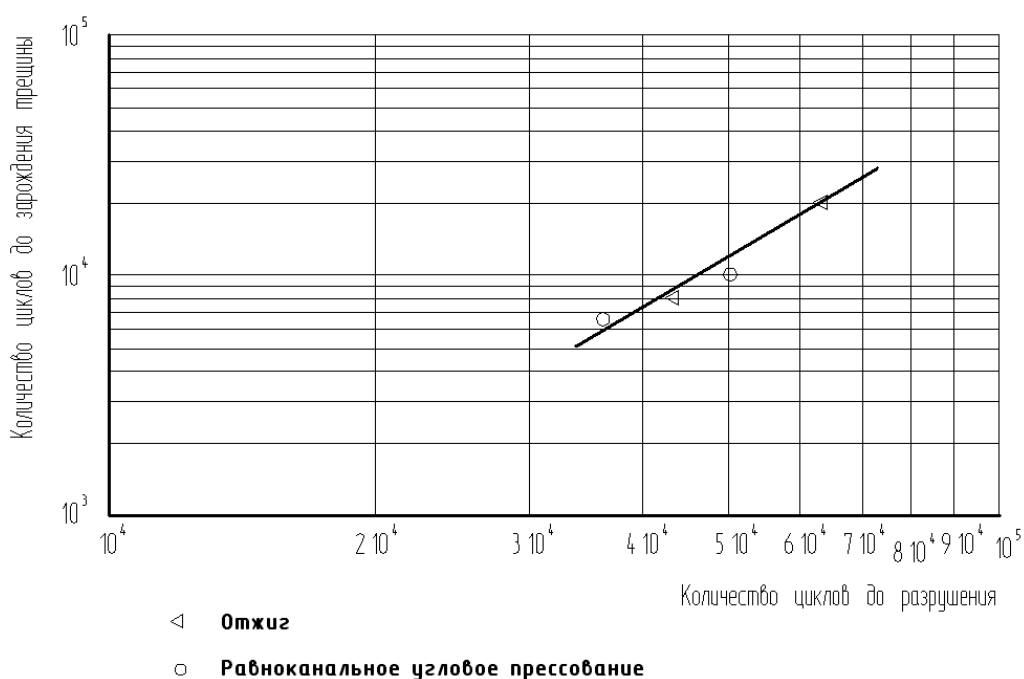


Рисунок 35 – Зависимость Nз (цикл) от N (цикл) в двойных логарифмических координатах



На рисунке 36 представлено процентное отношение количества циклов до зарождения трещины. Оно находится для образцов после гомогенизирующего отжига и после равноканального углового прессования примерно на одном уровне - 19 %.

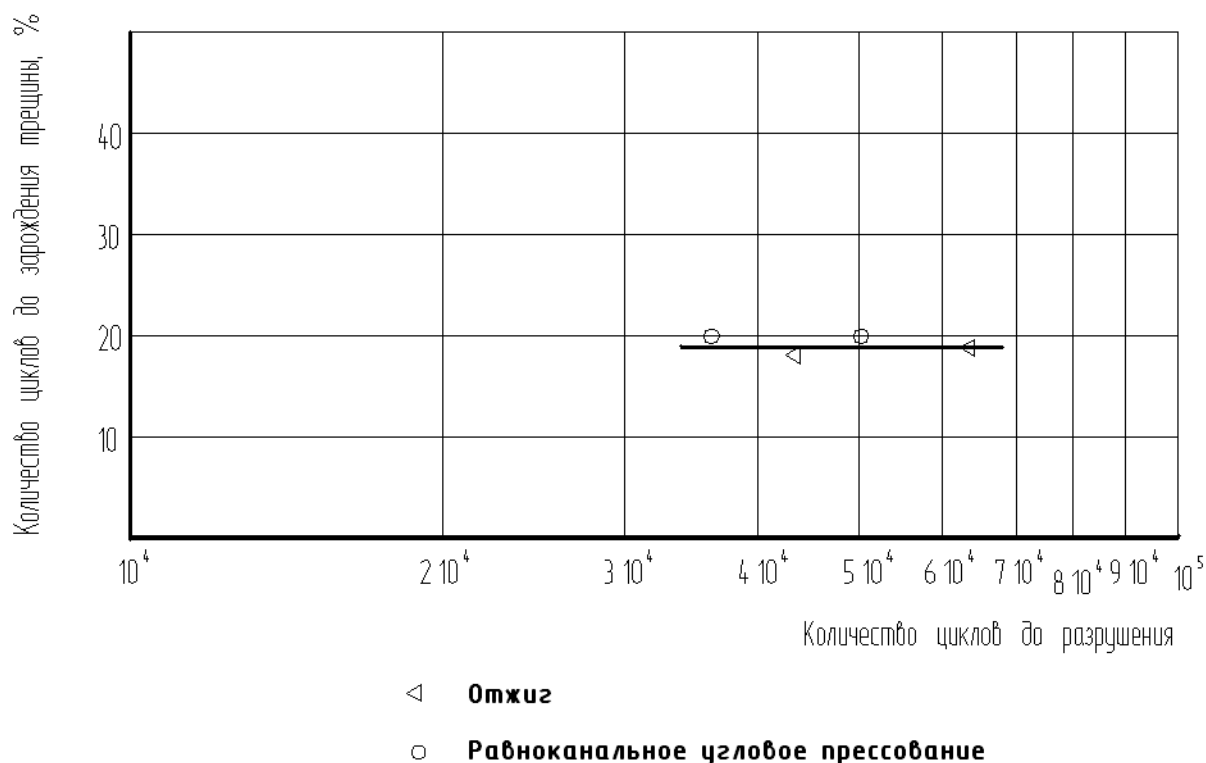


Рисунок 36 – Зависимость  $N_z$  (%) в обычных координатах от  $N$  (цикл) в полулогарифмических координатах

### 3.3 Влияние РКУП на строение усталостных изломов

На поверхности всех усталостных изломов сплава Mg6Al видны две зоны: зона усталостного развития трещины  $I_f$  и зона долома, рисунок 36 а, б. В случае сплава после отжига зона  $I_f$  имеет кристаллическое строение, а зона долома – большую шероховатость. В изломах сплава после РКУП зона  $I_f$  гладкая, а зона долома имеет волокнистое строение [18]. В очаге разрушения

всех изломов хорошо видны ступени и гребни, свидетельствующие о многоочаговом характере зарождения усталостной трещины рисунок 37 а, б.

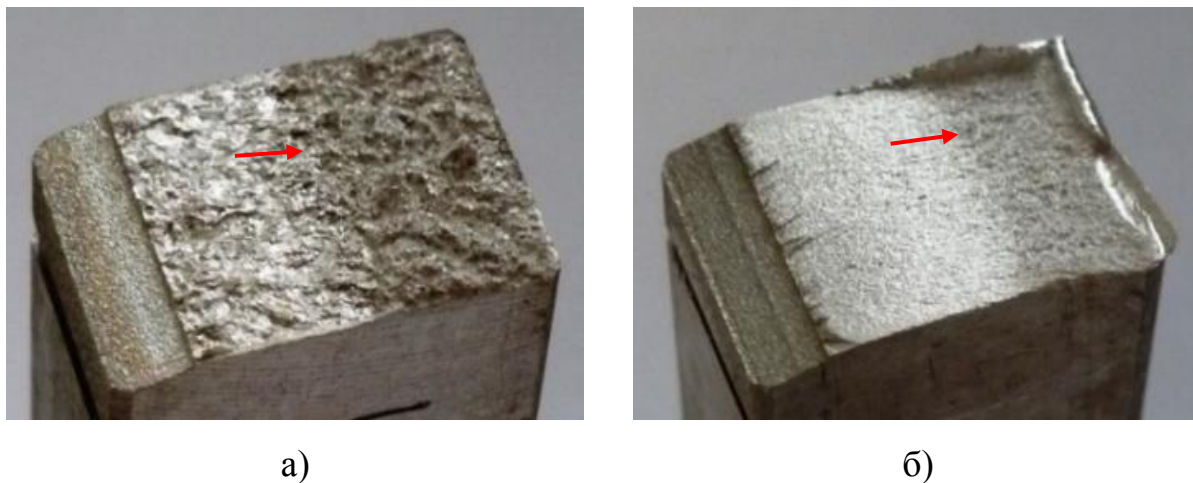


Рисунок 37 – Общий вид усталостных изломов образцов из сплава Mg6Al после отжига (а) и после РКУП (б). Стрелкой отмечена длина зоны  $I_f$

Таблица 3 – Общая долговечность образцов ( $N$ ) из сплава Mg6Al, количество циклов на распространение усталостной трещины ( $N_p$ ) и длина зоны ( $I_f$ ) на поверхности изломов

Состояние	$\Delta P$ , Н	$N$ , цикл	$N_p$ , цикл / %	$I_f$ , мм
КЗ (Исходное)	800	$6.32 \cdot 10^4$	51200/ 81%	5.5
	1000	$4.29 \cdot 10^4$	34900/81%	6.5
УМЗ (РКУП)	800	$5.09 \cdot 10^4$	40900/80%	7.0
	1000	$3.68 \cdot 10^4$	29300/79%	8.0

По результатам исследований, приведенных в таблице 3 построен график зависимости длины усталостной зоны  $I_f$  от количества циклов на распространение усталостной трещины  $N_p$ , рисунок 38. Согласно графику следует, что протяженность области распространения усталостной трещины для нагрузки 800 Н после РКУП превышает значения для исходного состояния примерно на 20%. Для нагрузки 1000 Н после РКУП превышает

значения для исходного состояния примерно на 22%. Из чего следует, что перевод сплава в ультрамелкозернистую структуру повышает сопротивление распространению трещин [17].

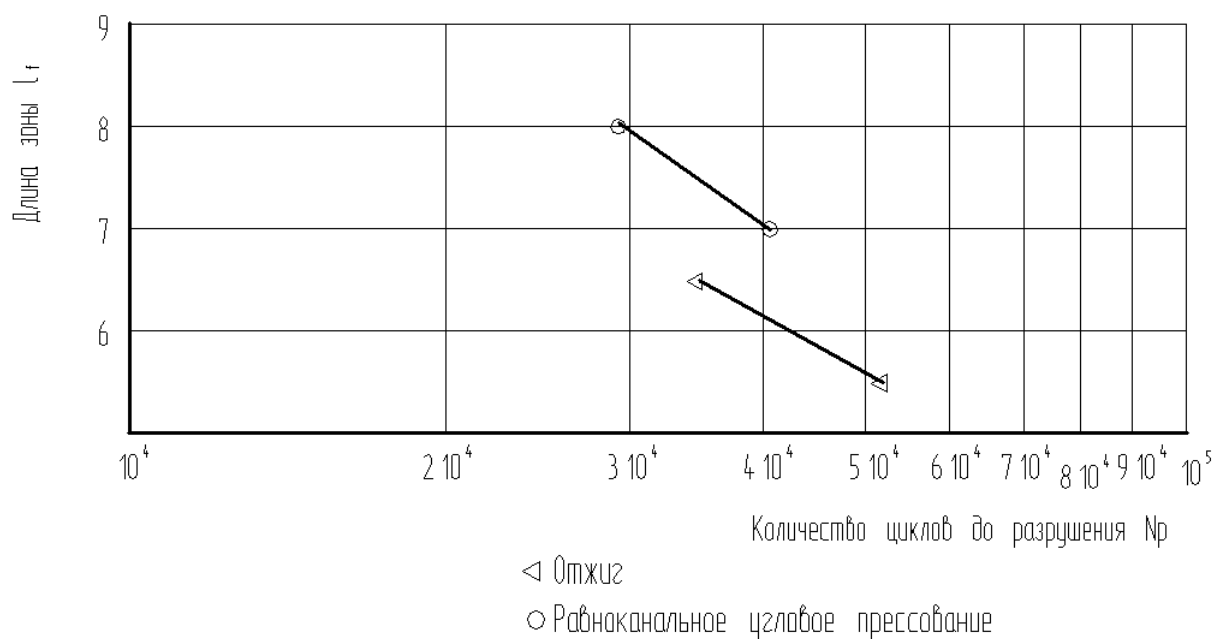


Рисунок 38 – Зависимость длины усталостной зоны  $l_f$  от количества циклов на распространение усталостной трещины  $N_p$  в образцах из сплава Mg6Al

### Выводы по разделу 3

Применение сплавов магния ограничивается низкими показателями прочности. Для повышения механических характеристик можно применить технологии интенсивной пластической деформации. При этом такие характеристики материала как предел прочности, предел текучести возрастают, а пластичность незначительно увеличивается.

Исследования сплава магния на твердость проводили на твердомере ТН 300. Для измерения прочности применяли на универсальную испытательную машину Н50КТ. Исследование микроструктуры сплава в исходном состоянии и после равноканального углового прессования проводили на металлографическом микроскопе Olympus GX-5.

Сравнение микроструктуры сплава Mg6Al после гомогенизирующего отжига и после равноканального углового прессования (РКУП) показало, что средний размер зерен уменьшился в 4 раза. Показатели твердости возросли в 1,2 раза, предел прочности увеличился в 1,13 раза, предел текучести – в 1,3 раза. Также возросло относительное удлинение, примерно, в 1,2 раза [15].

С увеличением общего количества циклов до разрушения образцов  $N$ , количества циклов до зарождения усталостной трещины  $N_z$  также возрастает, однако независимо от состояния сплава остается равным, примерно, 19 % от  $N$ .

Анализ строения усталостных изломов показал, что длина усталостной зоны  $l_f$  на поверхности изломов сплава, полученного после РКУП больше, чем на поверхности изломов сплава в отожженном состоянии. Следовательно сплав после РКУП обладает большей циклической трещиностойкостью.

Таки образом, сплав Mg6Al после РКУП подходит для применения там, где требуются высокие значения прочностных характеристик при растяжении и циклических нагрузках.

## Заключение

Проводили исследования циклической прочности сплава Mg6Al. Данный сплав применяется в медицине в качестве биоразлагаемого материала. При этом до момента своего разложения сплав должен выполнять свои функции, например удерживать в заданном положении поврежденные кости. Применение сплавов магния в качестве биоразлагаемых материалов позволяет обойтись от повторной операции удаления введенных в организм человека фиксирующих элементов.

Однако применение сплавов магния ограничивается низкими показателями прочности. Увеличить механические характеристики можно применив интенсивную пластическую деформацию. При этом такие характеристики материала как предел прочности, предел текучести возрастают, а пластичность незначительно увеличивается.

Исследовали механические характеристики сплава в исходном состоянии и в ультрамелкозернистом. Для перевода структуры сплава в мелкозернистое состояние из возможных способов применили равноканальное угловое прессование (РКУП). Маршрут прессования Вс, т.е. после каждого прохода заготовка поворачивалась на угол 90°. Всего проходов было 4.

Сравнение микроструктуры сплава после гомогенизирующего отжига и после равноканального углового прессования показало, что средний размер зерен уменьшился в 4 раза. Показатели твердости возросли в 1,2 раза, предел прочности увеличился в 1,13 раза, предел текучести увеличился в 1,3 раза. Также возросли показатели пластичности, примерно в 1,2 раза.

Таким образом, если рассматривать в комплексе, после равноканального углового прессования механические характеристики сплава при растяжении изменились в благоприятную сторону.

Результаты исследований циклической прочности показали, что при одном и том же напряжении цикла общее количество циклов до разрушения

несколько больше у образцов, после гомогенизационного отжига. Количество циклов до зарождения усталостной трещины возрастает в зависимости от общей долговечности образцов. Однако, если принимать во внимание процентное отношение количества циклов до зарождения трещины, то оно находится для образца после гомогенизирующего отжига и в ультрамелкозернистом состоянии примерно на одном уровне и равно, примерно 19 %.

Анализ усталостных изломов показывает, что длина зоны усталостного развития усталостной трещины  $l_f$  на поверхности изломов больше у образцов подвергнутого обработке равноканальным угловым прессованием. Следовательно циклическая трещиностойкость сплава после РКУП выше, по сравнению с отожженным состоянием.

Таким образом, сплав Mg6Al с ультрамелкозернистой структурой может быть рекомендован для применения там, где требуются высокие значения прочностных характеристик. Например, для наложения шинирования в травматологии или челюстно-лицевой хирургии.

## Список используемой литературы и используемых источников

1. Ботвина, Л.Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов / Л.Р. Ботвина. – М. : Наука, 1989. – 230 с.
2. Ботвина, Л.Р. Макро- и микрофрактографические особенности рассредоточенного ударного разрушения в стали 45 в интервале вязко-хрупкого перехода / Л.Р. Ботвина, Г.В. Клевцов // Металловедение и термическая обработка металлов, 1985. – № 2. – С. 27–29.
3. Герасимова, Л.П. Изломы конструкционных сталей : справ. изд. / Л.П. Герасимова, А.А. Ежов, М.И. Маресев. – М. : Металлургия, 1987. – 272 с.
4. Гордеева, Т.А. Анализ изломов при оценке надежности материалов / Т.А. Гордеева, И.П. Жегина. – М. : Машиностроение, 1979. – 199 с.
5. Горина, Л. Н. Обеспечение безопасных условий труда на производстве: учеб. пособие. Л. Н. Горина. Гриф УМО. Тольятти : ТолПИ. 2000. 79 с.
6. Гостюшин А. В. Энциклопедия экстремальных ситуаций. М.: Изд. «Зеркало», 1995. 288 с.
7. Гринин А. С., Орехов Н.А. Экологический менеджмент : учеб. пособие для вузов. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. 206 с.
8. Действия населения в чрезвычайных ситуациях. Пособие. Под общей редакцией В.А. Владимирова. М.: МЧС России, 1995. 230 с.
9. Егоров А.Г., Уполовникова Г.Н., Живоглядова И.А. Правила оформления выпускных квалификационных работ для бакалавриата и специалитета: учебно-методич. пособие по выполнению дипломного проекта. Тольятти.: ТГУ, 2011. 87 с.
10. Клевцов, Г.В. Пластические зоны и диагностика разрушения металлических материалов / Г.В. Клевцов. – М. : МИСиС, 1999. – 112 с.

11. Клевцов, Г.В. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций/ Г.В. Клевцов, Л.Р. Ботвина, Н.А. Клевцова, Л.В. Лимарь. - М.: МИСиС, 2007. - 264 с.
12. Клевцова, Н.А. Разрушение аустенитных сталей и мартенситные превращения в пластических зонах / Н.А. Клевцова, О.А. Фролова, Г.В. Клевцов. – М. : Изд-во Академии естествознания, 2005. – 155 с.
13. Огневой В.Я. Основы фрактографии: Учебное пособие. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2004. – 95 с.
14. Расчеты и испытания на прочность : Классификация видов изломов металлов : метод. указания (РД 50-672–88). – М. : ВНИИНМАШ, 1988. – 32 с.
15. Фрактография и атлас фрактограмм : справочник /под ред. М.Л. Бернштейна ; пер. с англ. Е.А. Шура. – М. : Металлургия, 1982. – 489 с.
16. Энгель, Л. Растровая электронная микроскопия. Разрушение : справ. изд. / Л. Энгель, Г. Клингел. – М. : Металлургия, 1986. – 232 с.
17. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций / Г.В. Клевцов [и др.]. – М. : МИСиС, 2007. – 264 с.
18. Фридман, Я.Б. Строение и анализ изломов металлов / Я.Б. Фридман, Т.А. Гордеева, А.М. Зайцев. – М : Машгиз, 1960. – 128 с.
19. Фрактография – средство диагностики разрушенных деталей / М.А. Балтер [и др.]. – М. : Машиностроение, 1978. – 184 с.
20. Чегуров М.К., Сорокина С.А. Основы фрактографического анализа изломов образцов из конструкционных сплавов: учеб. пособие / М.К. Чегуров, С. А. Сорокина; НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2018. – 79 с.