

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

Григорьева Анна Леонидовна

**Моделирование образования и развития усталостных  
трещин в металлических материалах при малоцикловой  
усталости**

Направление 22.04.01

«Материаловедение и технологии машиностроительных материалов»

**АВТОРЕФЕРАТ  
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

Коротченко  
Лариса Никитовна  
**Проверено**  
20.06.2024 Зачтено Библиотека

2024

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре  
государственный университет»

Научный руководитель: Башков Олег Викторович,  
кафедра Материаловедение и  
технология новых материалов,  
доктор технических наук,  
профессор, ФГБОУ ВО КНАГУ,  
заведующий кафедрой.

Рецензент: Жилин Сергей Геннадьевич,  
кандидат технических наук, доцент,  
ведущий научный сотрудник,  
институт машиноведения и  
металлургии ДВО РАН ФГБУН  
Хабаровского Федерального  
исследовательского центра ДВО РАН,  
г. Комсомольск-на-Амуре.

Защита состоится 19 июня 2024 года в 9:00 на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов» в Комсомольском на Амуре государственном университете по адресу: 681000, г. Комсомольске на амуре, пр. Ленина, 27, аудитории 202/2.

Автореферат разослан \_\_.06.2024 г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

*Актуальность темы* заключается в формировании подхода, основанного на анализе и сравнении экспериментальных исследований с программными данными, которые подтверждают выдвинутую гипотезу о функциональной зависимости (напряжение и количество циклов нагружения), (напряжение и предел выносливости материала) и позволяют установить границу адекватности эксперимента, соответствие данных, полученных различными методами. Благодаря проведенному исследованию, можно создать математическую модель (с высокой степенью точности и малым доверительным интервалом), определить границы допустимого исследования, и не прибегая к трудоемкому использованию лабораторного оборудования проводить исследования элементов конструкций на усталостное нагружение, определять пределы выносливости и сроков службы. Тем самым сократится трудоемкость производства, что в приведет к оптимизации временных и материальных ресурсов.

*Целью* данной работы заключается в моделировании поведения материала в состоянии предшествующем образованию усталостных трещин при малоцикловом нагружении.

*Задачи:*

- Изучить предметную область исследования на усталостное нагружение;
- Выделить математическую модель нагружения при малоцикловой усталости (аналитический и численный подход);
- Изучить работу программного комплекса Ansys Workbench, смоделировать деталь для усталостного нагружения (в соответствии с ГОСТ), провести экспериментальное исследование;
- Провести сравнительный анализ экспериментальных и программных данных, сделать выводы.

*Объектом* исследования является процесс усталостного нагружения детали из сплава алюминия Д16.

*Предметом исследования являются* математические закономерности и модели поведения материала при малоцикловом нагружении.

*Научная новизна исследования*

- получены новые сведения о характере разрушения определяемом по размерам развивающихся трещин, которые могут являться дополнительной информацией о изменении характера разрушения исследуемого материала, связанного, например, с изменением его свойств при термической обработке.

- выполнено численное моделирование малоцикловой усталости алюминиевого сплава Д16 с использованием экспериментальных характеристик материала, которые повысили достоверность моделирования;

- установлено соответствие результатов численного моделирования результатам экспериментальных исследований по определению усталостной долговечности алюминиевого сплава Д16 с погрешностью, не превышающей 20%, по результатам моделирования определен диапазон предельных напряжений эксплуатации материала.

*Достоверность и обоснованность результатов исследования.*

Основные положения и выводы работы обоснованы, аргументированы применением аппарата математического моделирования, а также подтверждены анализом полученных различными методами данных использованными методами (экспериментальный и численный).

*Практическая значимость* заключается в установлении возможности использования результатов проведенного исследования и полученных математических закономерностей в реальных условиях производства различных деталей из металлических сплавов с целью повышения эффективности проектирования изделий.

*Апробация результатов*

*Конференции:*

- Актуальные проблемы информационно-телекоммуникационных технологий и математического моделирования в современной науке и промышленности, Комсомольск-на-Амуре, 20–25 марта 2022 г.

- Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению, Комсомольск-на-Амуре, 07–11 февраля 2022 г.
- Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. V Всероссийская национальная научная конференция молодых учёных. Том Часть 2. Комсомольск-на-Амуре, 2022 г.
- Current problems and ways of industry development: equipment and technologies Warsaw, 01 января – 31 декабря 2021 г.
- Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению. Комсомольск-на-Амуре, 16–17 ноября 2023 года

Публикации:

1. Моделирование образования и развития усталостных трещин в металлических материалах при малоциклового усталости. Григорьева А.Л., Башков О.В. В сборнике: Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению. Материалы II Международной научно-практической конференции молодых ученых. Редколлегия: А.В. Космынин (отв. ред.) [и др.]. Комсомольск-на-Амуре, 2022. С. 44-46.

2. Малоциклового нагружение плоского образца с непрерывным полем скоростей перемещений при учёте условия сжимаемости материала Канашин И.В., Григорьева А.Л., Хромов А.И., Григорьев Ян.Ю. Труды МАИ. 2023. № 130.

3. Регрессионная модель поведения алюминиевого сплава b95 при растяжении изделия. Чепурных М.А., Базюк А.И., Канашин И.В., Григорьева А.Л. В сборнике: МОЛОДЕЖЬ И НАУКА: АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ. Материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. Комсомольск-на-Амуре, 2022. С. 409-411.

4. Математическая модель процесса деформирования элементов, изготовленных из конструкционных материалов с использованием машинного

обучения. Григорьев Ян.Ю., Григорьева А.Л., Канашин И.В., Петрова А.Н., Хромов А.И. Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2022. № 1 (57). С. 15-23.

5. Моделирование процесса деформирования экспериментального образца при условии малоциклового нагружения. Канашин И.В., Хромов А.И., Григорьева А.Л., Григорьев Ян.Ю. Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2022. № 5 (61). С. 26-31.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

1. Канашин И.В., Григорьев Я.Ю., Григорьева А.Л. Определение параметров малоциклового нагружения плоских образцов из металлических материалов. Заявка № 2024660244 дата поступления 07.05.2024 № 2024661090 от 15.05.2024

2. Канашин И.В., Григорьев Я.Ю., Григорьева А.Л. Определение констант разрушения на основе испытаний плоских образцов. Заявка № 2024660243 дата поступления 07.05.2024 № 2024661413 дата регистрации 17.05.2024

*Структура и объем.*

Магистерская диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников. Объем работы – 76 страниц, в том числе 39 рисунков, 6 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрывается актуальность темы, определяются цели и задачи исследования.

В первой главе приводится описание исследуемых процессов на различные виды усталостного нагружения. Описываются основные понятия и определения используемые при этом. Приводятся основные методы испытания на усталость (рисунок 1).



Рисунок 1 - Виды усталостного нагружения и характеристики

Также описываются методики проведения усталостных испытаний.

Приводится описание стандартного оборудования, предназначенного для усталостных нагружений (рисунок 2).

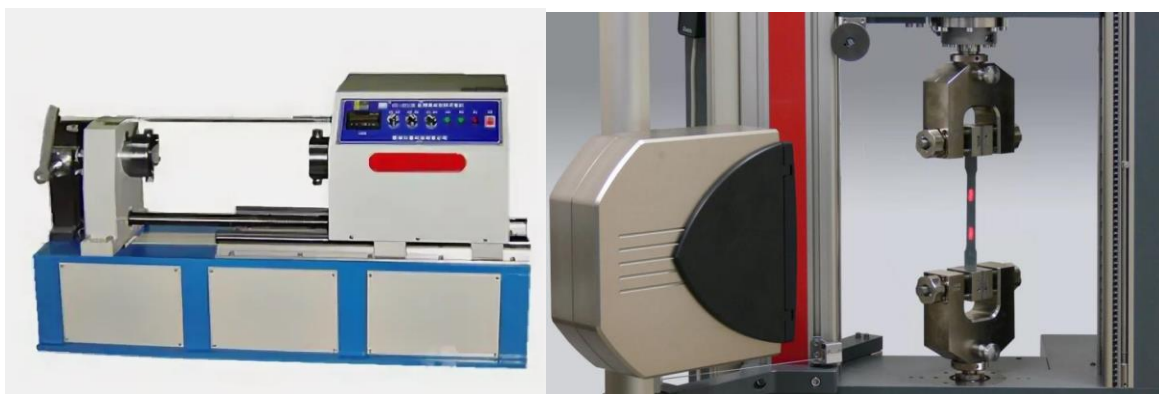


Рисунок 2 - Оборудование для испытания на усталость

*Во второй главе* описывается математическая модель циклического нагружения образца, изготовленного из алюминиевого сплава Д16. Данная модель позволяет провести программное исследование и получить данные необходимые для проведения анализа экспериментальных данных на целесообразность построения модели поведения материала.

Моделирование процесса происходит с помощью программного комплекса «ANSYS Mechanical». При более подробной конкретизации используется программный модуль ANSYS Mechanical Fatigue.

В данной главе предлагается следующая схема исследования (рисунок 3):



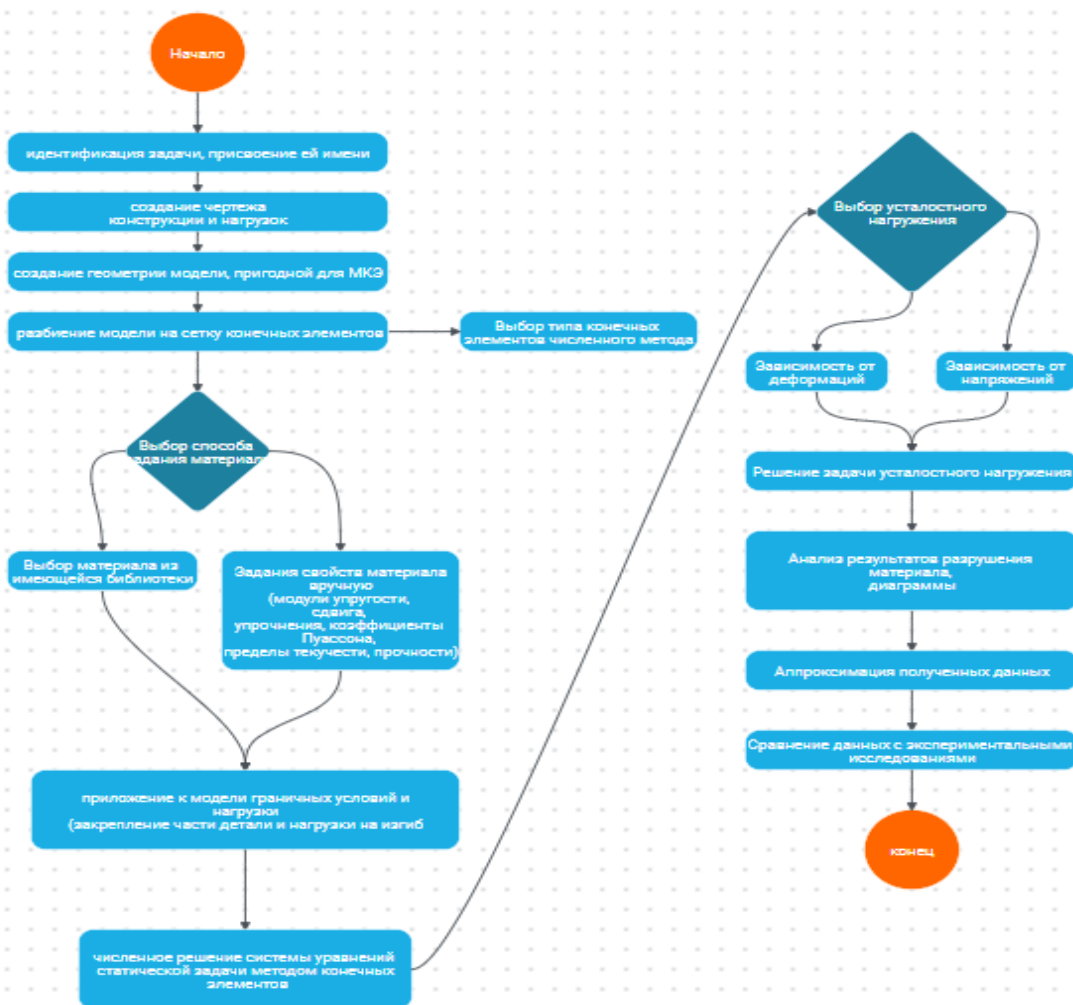


Рисунок 3 - Блок-схема математической модели

Согласно представленной выше блок-схеме на первом шаге было проведено создание чертежа и приложенных к данной детали нагрузок, а также задание начальных и граничных условий.

Для оценки усталостных характеристик материалов и прогнозирования усталостной долговечности деталей предлагается использовать математическую модель процесса развития повреждений материала при циклическом нагружении. Математическое описание усталостных процессов строят на основе экспериментальных исследований механизма развития микротрещин. Рассматривается аналитическая модель усталостного нагружения:

$$\mathbf{Z} = \left( \frac{12WG}{\pi D} \right)^{\frac{1}{2}} \rightarrow \min \quad - \quad \text{целевая функция}$$

Система ограничений:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{\omega} = N_o + N_c \\ N_{\omega} = \frac{1}{\pi^{\frac{1}{2}} \left( \frac{n}{2} - 1 \right) l_0^{\left( \frac{n}{2} \right) - 1} \left( \frac{\sigma}{\rho} \right)^n \left( \frac{\rho}{c} \right)^n}; \\ \tau > \frac{2}{\beta} \left( \frac{WE}{D} \right)^{\frac{1}{2}}; \\ \sigma_{max} = \sigma_{-1} + a(N + B)^{-\alpha}; \\ n, \rho, c, \beta, \alpha - \text{константы материала}; \\ l_i - \text{геометрические размеры трещины}; \end{array} \right.$$

Также в данной главе рассматривается численный метод конечных элементов, он является основой работы многих САЕ программ.

Математическое описание МКЭ содержит систему уравнений вида:

1) Матричное уравнение:

$$[K]\{U\} = \{F\}$$

Где  $[K]$  – глобальная матрица жесткости;

$\{U\}$  – вектор перемещений (матрица-столбец);

$\{F\}$  – вектор нагрузок (матрица-столбец).

$$[K] = \begin{bmatrix} [k_{11}] & [k_{12}] & \dots & [k_{1i}] \\ [k_{21}] & [k_{22}] & \dots & [k_{2i}] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ [k_{i1}] & [k_{i2}] & \dots & [k_{ii}] \end{bmatrix}, \{U\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \end{Bmatrix}, \{F\} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \end{Bmatrix}.$$

2) Далее после однозначно определенного поля перемещений в узлах сетки, определяется в узлах значения напряжений и деформаций:

$$[\varepsilon] = [\beta][U]$$

$$[\sigma] = [k][\beta][U]$$

где  $[\varepsilon] = \{\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}\}$  – компоненты деформаций;  $[\sigma] = \{\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}\}$  – компоненты напряжений;  $[\beta]$  – прямоугольная матрица, получаемая из соотношений Коши;  $[k]$  – матрица упругих констант материала, получаемая с помощью закона Гука.

В третьей главе описывается метод моделирования испытания на циклическую усталость образца из алюминиевого сплава Д16. Также описываются проведенные эксперименты на малоцикловое нагружение.

Согласно ГОСТ 25.502-79 (методы механических испытаний металлов) был рассмотрен образец (рисунок 4), изготовленный из алюминиевого сплава Д16.

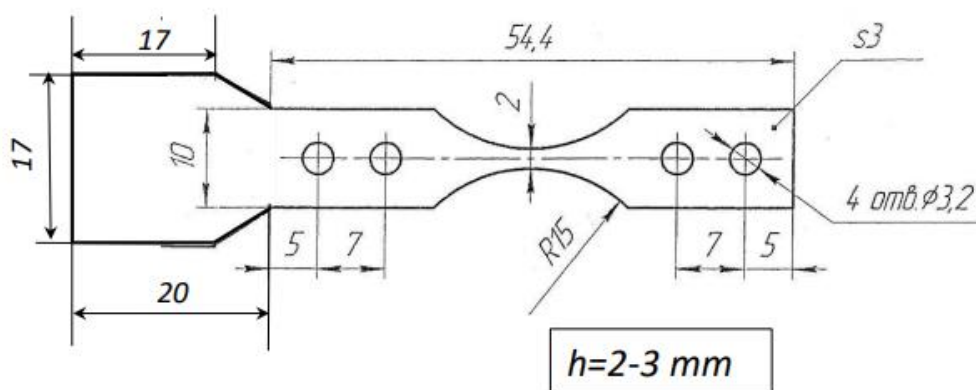


Рисунок 4 - Образец на малоцикловое нагружение

На рисунке 5 приводится вид образца построенного в программном комплексе «ANSYS Mechanical».

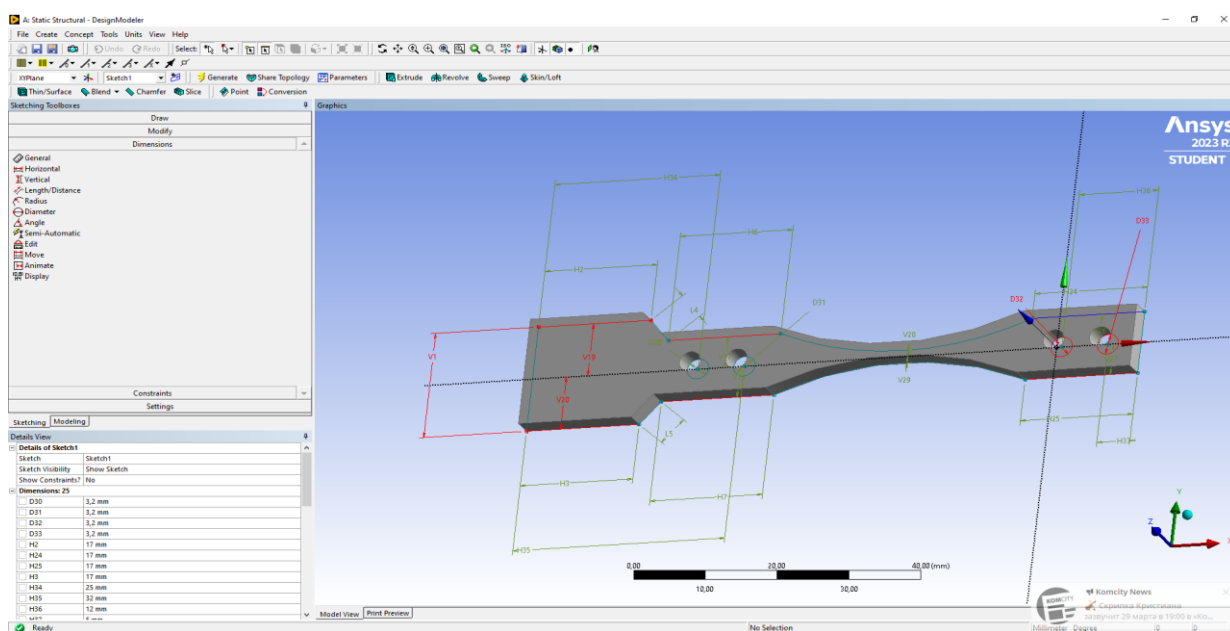


Рисунок 5 - Образец для испытания

Согласно алгоритму, модель разбивается на конечные элементы (рисунок 19):  
 а далее на полученную модель накладываются граничные и начальные условия в  
 виде фиксации перемещений:

$$u_x = 0, u_y = 0, u_z = 0$$

и задания приложенной нагрузки:

$$\vec{F} = \{0, 0, f\}$$

Задается материал алюминиевый сплав – Д16, из которого изготавливается  
 данный образец, свойства сплава указаны на рисунке 21 и в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав алюминиевого сплава Д16

Сплав	Содержание основных элементов, вес. %										
	Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Ni	Al	Cu	Mg	Zn	Примесей
Д16	≤0,5	≤0,5	0,3- 0,9	до 0,1	≤0,15	-	90,9- 94,7	3,8- 4,9	1,2- 1,8	≤0,25	прочих 0,05

Далее приводится алгоритм работы программы для проведения  
 исследования на усталость. Производится статическое нагружение, после  
 чего, используется полученная кривую нагружения, с помощью встроенного  
 модуля на расчет усталостных характеристик ANSYS Mechanical Fatigue  
 производится расчет усталостных характеристик.

Для задания метода описания кривой усталости в модуле усталость  
 используется SN подход (*Stress Life*).

В ходе исследования проводятся эксперименты, которые позволяют  
 определить усталостные характеристики:

Первая усталостная характеристика – напряжение.

Она представлена на рисунке 6. Распределение напряжения по всему  
 образцу после циклического нагружения, в области красного цвета  
 напряжение принимает максимально возможное значение (нашем случае  
 средняя часть детали), далее значения напряжений уменьшаются в  
 соответствии с цветовой палитрой.

Вторая усталостная характеристика - усталостная долговечность (*Life*) (рисунок 6). Усталостная долговечность – прогнозируемый период времени нагружения, по истечении которого под воздействием расчетного спектра может произойти усталостное разрушение.

Это количество циклов, которое может вынести данная деталь. В нашем случае минимальное количество циклов сосредоточено в месте максимального напряжения (окрашено красным цветом).

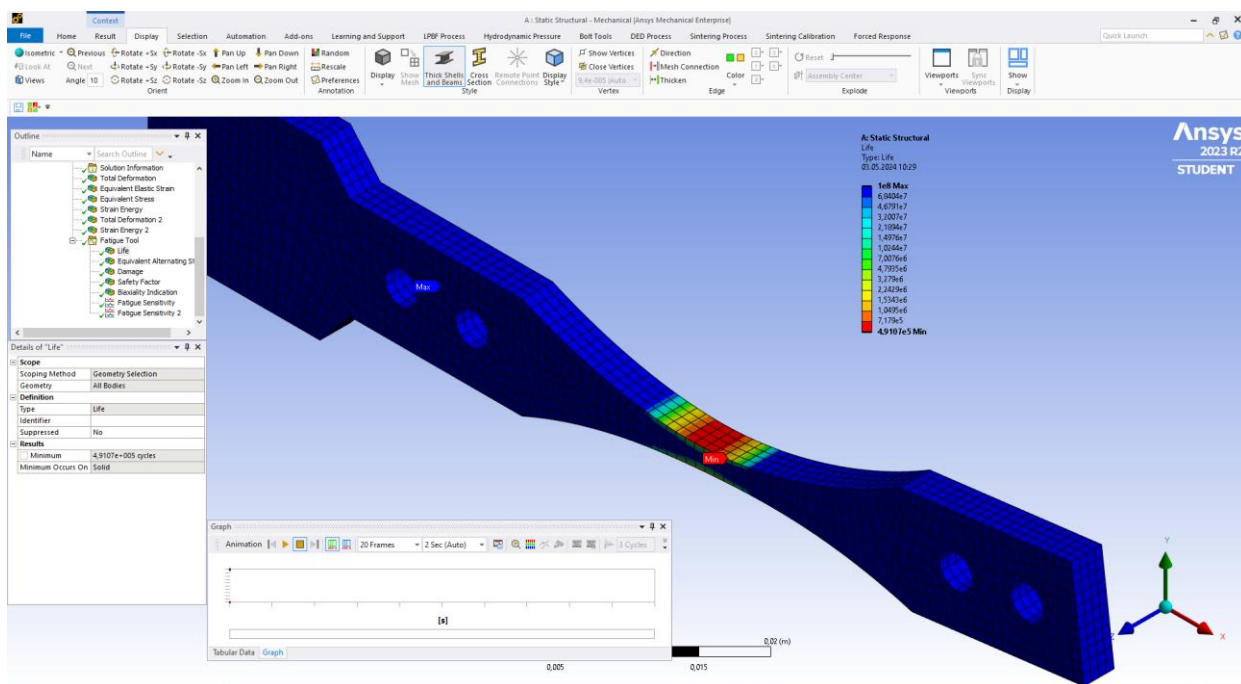


Рисунок 6 - Усталостная долговечность до момента усталостного разрушения

Третьей усталостной характеристикой является - коэффициент запаса по долговечности (*damage*).

Согласно рисунку 7 наибольшее значение коэффициента запаса по долговечности (красный цвет на модели) будет в средней части детали.

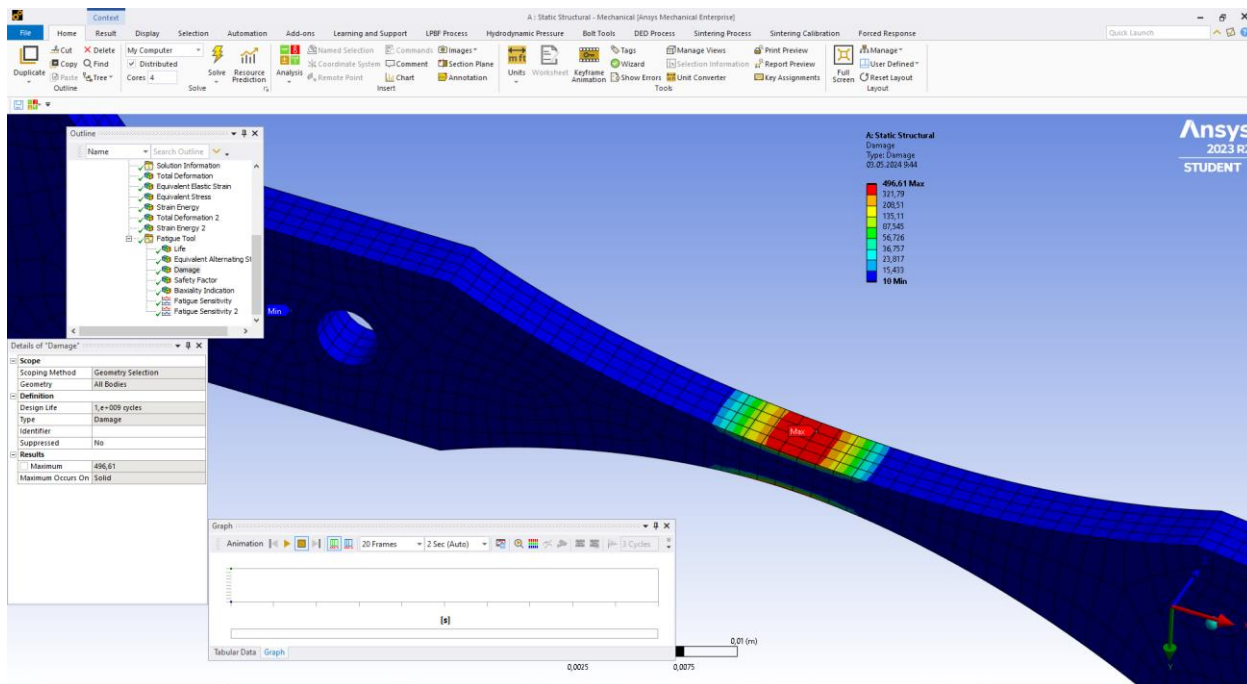


Рисунок 7 - Коэффициент запаса по долговечности (damage)

Четвертой характеристикой является коэффициент запаса по амплитудам напряжения.

В данной главе проводятся множественные нагружения в программе, определяются данные и строится кривая нагружения (рисунок 8) на данном рисунке обозначено значение напряжения (предел усталости), при действии которого не происходит усталостного разрушения), а также путем аппроксимации данных получено уравнение (напряжение – число циклов), степенное уравнение имеет вид:

$$\sigma = 633 * n^{-0.11}$$

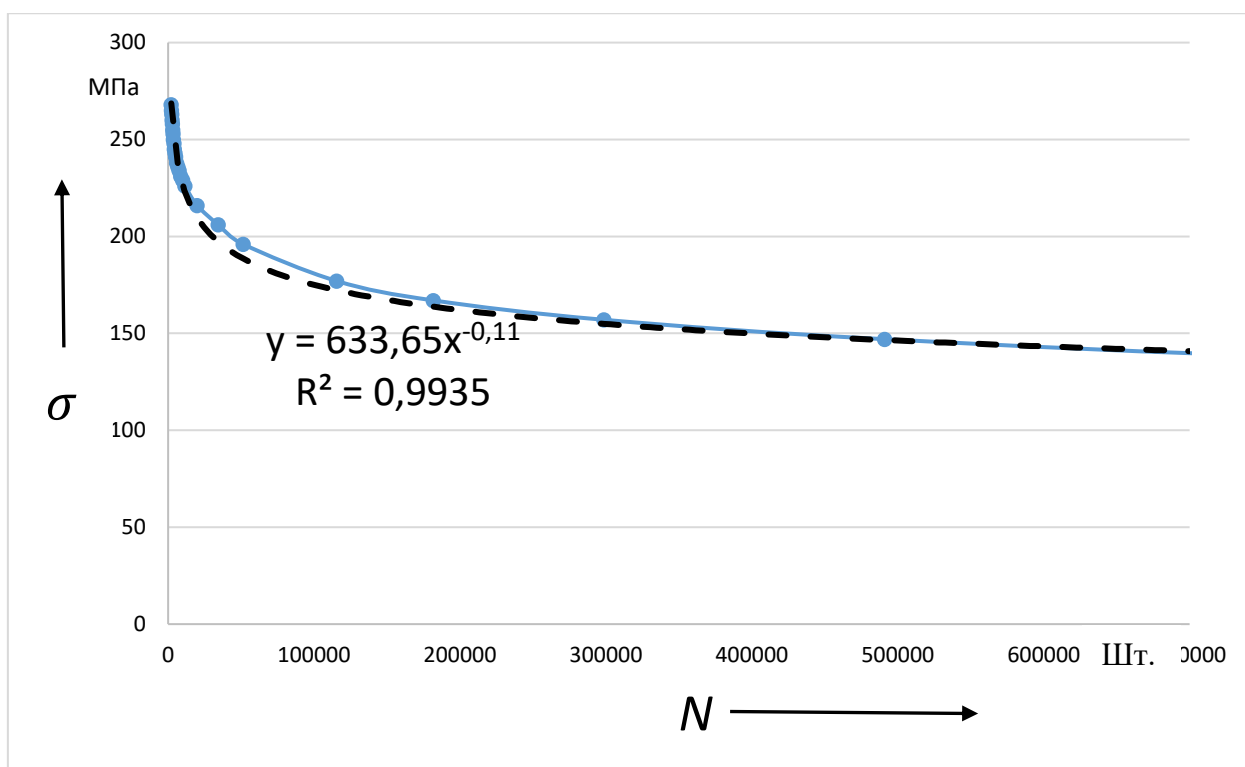


Рисунок 8 - Кривая усталости математической модели для сплава Д16

Также в данной главе приводится физический эксперимент деформации алюминиевого сплава Д16 при циклической нагрузке. Нагружение образца осуществляется путем возбуждения переменного электромагнитного поля и поддержания резонансных изгибных колебаний образца с жестко прикрепленным к нему стержнем. Частота резонансных колебаний в зависимости от значения модуля упругости испытываемого материала может составлять 30-50 Гц. Программное обеспечение управления установкой позволяет регистрировать изменение частоты колебаний в процессе образования и роста усталостной трещины (рисунок 9).



Рисунок 9 - Лабораторная установка для определения усталостных характеристик легких сплавов

На рисунке 10 представлены результаты экспериментального моделирования нагружения образца.

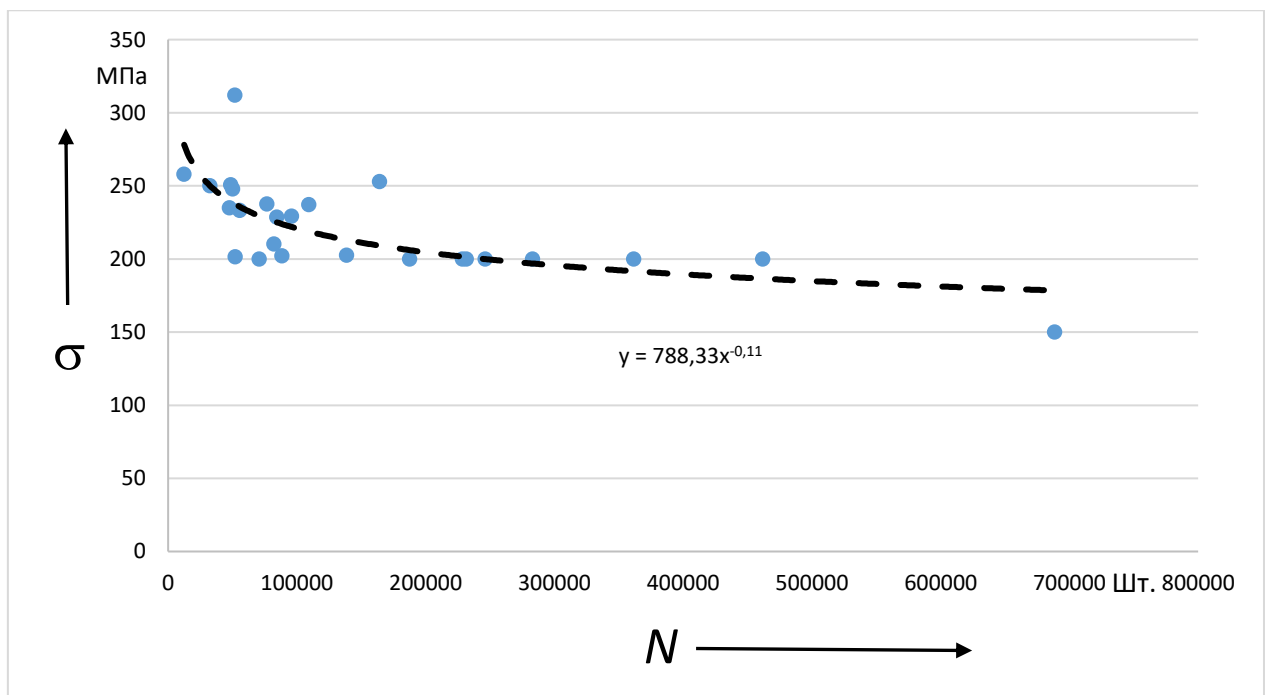


Рисунок 10 - Кривая усталости (экспериментальные данные)

Испытание на усталость выполнялось под управлением специализированного программного обеспечения, которое позволяло



поддерживать отклонение образца симметрично от заданного начального положения, что соответствовало симметричному изгибному нагружению при испытании в режиме  $R = -1$ . Испытание выполнялось в условиях резонансных колебаний при частоте, определяемой упругими свойствами испытываемого материала и длиной поводка, прикрепленного к подвижной части образца. По мере накопления повреждений в образце и появления в нем трещин, происходит изменение резонансной частоты колебаний. Как правило, снижение частоты происходит при образовании и дальнейшем росте магистральной трещины, определяющей необратимость наступления повреждений. Снижение частоты может являться критерием начала наступления разрушения, хотя период развития трещины может продлиться еще до половины периода долговечности материала при сохранении условий нагружения материала (рисунок 11).

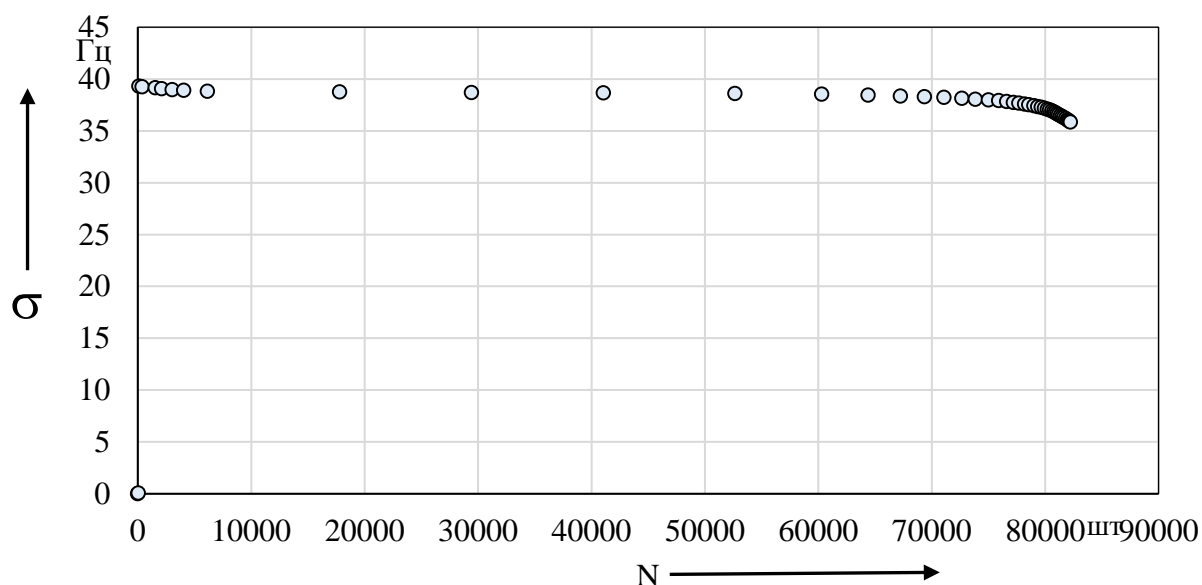


Рисунок 11 - Диаграмма зависимости (частота – количество циклов) для образца из алюминиевого сплава Д16

Характер развития, число образовавшихся трещин позволяет в некоторой мере определить сопротивляемость материала разрушению. В связи с этим для образцов, испытанных при различных напряжениях цикла был

выполнен расчет длин трещин, которые являются видимыми и могут быть измерены при использовании микроскопа.

Графическая зависимость длин трещин для различных образцов представлена на рисунке 12.

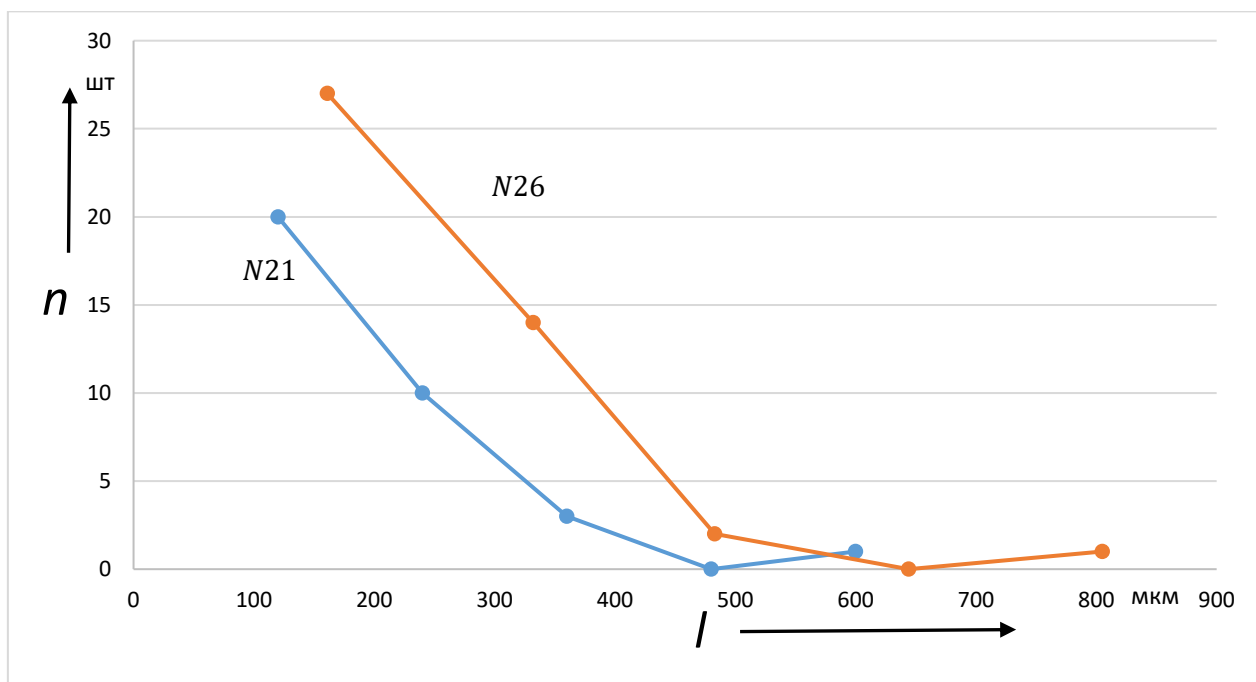


Рисунок 12 - Зависимость количества трещин от длины трещин при напряжении 250 МПа

В соответствии с полученными данными регрессионная зависимость напряжения от количества циклов для экспериментальной модели имеет вид:

$$\sigma = 788 * n^{-0.11}$$

Проводится подробное исследование и сравнительный анализ полученных данных, строятся диаграммы вида (рисунок 13), где оранжевая линия представляет регрессионное уравнение, описывающее данные полученные с помощью программы, а голубая линия данные из физического эксперимента. Визуально показано, что кривые проходят относительно близко друг к другу, что говорит о достоверности выдвинутых гипотез.

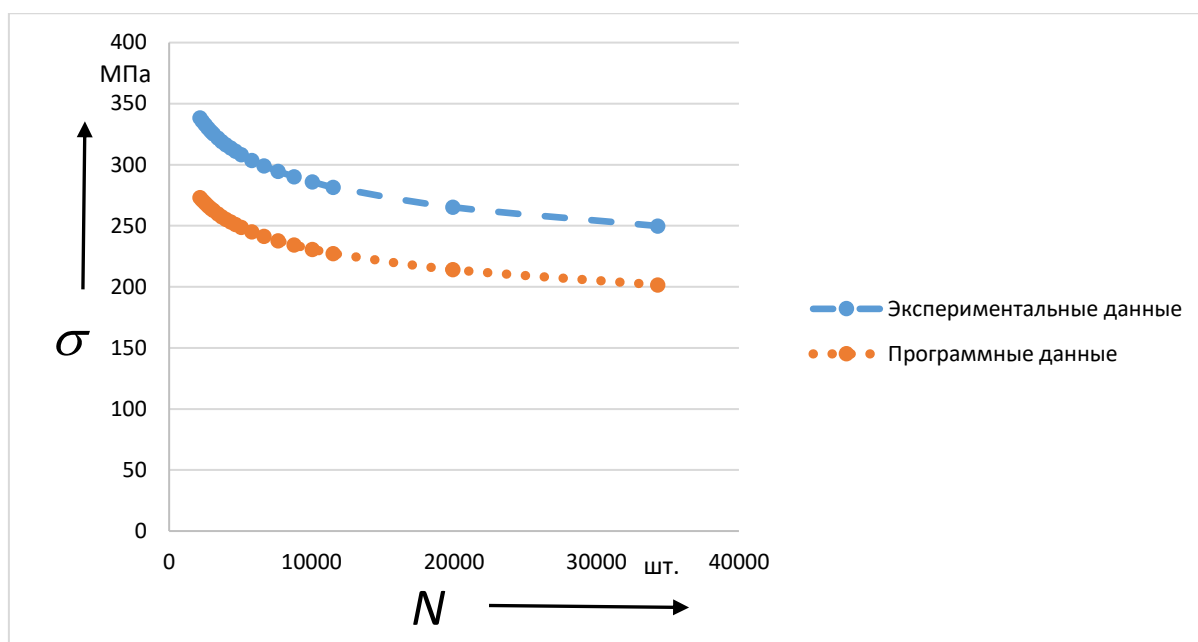


Рисунок 13 - Сравнительные диаграммы нагружения: экспериментальные и результаты моделирования

Относительная погрешность модели не превышает 19 %, что показывает высокую достоверность процесса моделирования при указании свойств исследуемого материала исходя из справедливых данных.

*В заключении* представляются выводы по проделанному научному исследованию, описывается актуальность проведенных вычислений, подтверждается достоверность и адекватность полученных математических формул.

Также подчеркивается, что ведение в модель экспериментальных характеристик материала может повысить достоверность моделирования, что существенно сокращает в перспективе время, затраченное на проведение исследований хоть и не исключает проведение экспериментальных исследований полностью. Экспериментальная проверка модели может быть проведена в крайних точках, определяющих диапазон напряжений эксплуатации материала.

Получение сведений о характере разрушения определяемом по виду развивающихся трещин может являться дополнительной информацией о изменении характера разрушения исследуемого материала, связанного, например, с изменением его свойств при термической обработке.