

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий

Направление подготовки: *Материаловедение и технологии материалов*

Отделение материаловедения

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Исследование процессов роста усталостной трещины при неоднородном нагружении с использованием метода корреляции цифровых изображений

УДК 669.715.002.6:620.186

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Б41	Заречнев Владислав		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Инженер ЛМПКМ ИФПМ СО РАН	Еремин А.В.			

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ШИП	Гаврикова Н.А.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент отделения контроля и диагностики	Раденков Т.А.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
22.03.01 Материаловедение и технологии материалов	Овечкин Б.Б.	К.т.н., доцент		

Планируемые результаты обучения по ООП 22.03.01

Код результата	Результат обучения
	<i>Общекультурные компетенции</i>
P1	Способность применять основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении социально-общественных и профессиональных задач, способность анализировать социально-значимые проблемы и процессы. Осуществлять коммуникации в профессиональной среде и в обществе в целом, в том числе на иностранном языке.
P2	Демонстрировать понимание сущности и значения информации в развитии современного общества, владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации; использование для решения коммуникативных задач современных технических средств и информационных технологий.
P3	Способность самостоятельно применять методы и средства познания, обучения и самоконтроля, осознавать перспективность интеллектуального, культурного, нравственного, физического и профессионального саморазвития и самосовершенствования, уметь критически оценивать свои достоинства и недостатки.
P4	Способность эффективно работать в кооперации с коллегами, находить организационно-управленческие решения в нестандартных ситуациях и готовность нести за них ответственность, владеть основами общего и производственного менеджмента и использовать их в профессиональной деятельности.
P5	Демонстрировать знание правовых, социальных, экологических и культурных аспектов комплексной инженерной деятельности, осведомленность в вопросах охраны здоровья, использовать методы и приемы организации труда, обеспечивающие эффективное, экологически и технически безопасное производство.
	<i>Профессиональные компетенции</i>
P6	Умение использовать базовые знания математических и естественнонаучных дисциплин и дисциплин общепрофессионального цикла в объеме, необходимом для использования в профессиональной деятельности основных законов соответствующих наук, разработанных в них подходов, методов и результатов математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования в комплексной инженерной деятельности с целью моделирования объектов и технологических процессов в машиностроении.
P7	Умение использовать традиционные и новые технологические процессы, операции, оборудование, нормативные и методические материалы по технологической подготовке производства, качеству, стандартизации и сертификации изделий и процессов, умение выбора материалов для заданных условий эксплуатации с учетом требований технологичности, экономичности, надежности и долговечности, экологических последствий их применения.
P8	Умение применять основы высокотехнологичного инновационного менеджмента, в том числе малого бизнеса, владеть навыками в организации и техническом оснащении рабочих мест; разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений, оценке рисков и определении мер по обеспечению экологической и технической безопасности разрабатываемых материалов, техники и технологий.
P9	Умение использовать принципы и методики комплексных исследований, испытаний и диагностики, обработки и модификации материалов, изделий и процессов их производства, включая стандартные и сертификационные испытания; умение применять технические средства для измерения и контроля основных параметров технологических процессов, свойств материалов и изделий из них.
P10	Умение применять современные информационно-коммуникационные технологии, глобальные информационные ресурсы в научно-исследовательской и расчетно-аналитической деятельности в области материаловедения и технологии материалов.
P11	Умение использовать на практике современные представления наук о материалах, взаимодействии материалов с окружающей средой, владение навыками сбора данных, изучения, анализа и обобщения научно-технической информации по тематике исследования, разработки и использования технической документации, основных нормативных документов по вопросам интеллектуальной собственности, подготовки документов к патентованию, оформлению ноу-хау.
P12	Способность комплексно оценивать и прогнозировать тенденции и последствия развития науки о материалах, на основании комплексной оценки формулировать научно-техническую проблему в области изготовления, диагностики и применения наноматериалов. Знание внутри- и междисциплинарных связей в сфере профессиональной деятельности.

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий

Отделение материаловедения

Направление подготовки: *Материаловедение и технологии материалов*

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

Б.Б.

Овечкин
(Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
4Б41	Заречневу Владиславу

Тема работы:

Исследование процессов роста усталостной трещины при неоднородном нагружении с использованием метода корреляции цифровых изображений	
Утверждена приказом директора ИШ НПТ	Приказ № 1448/с от 02.03.2018

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	<i>Исследование влияния перегрузки на процесс распространения усталостной трещины в алюминиевом сплаве Д16Т с применением метода корреляции цифровых изображений. Оценка проводилась на основе расчета скорости роста усталостной трещины и величины максимальной деформации.</i>
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ol style="list-style-type: none">1. Обзор литературы, включающий рассмотрение основных механизмов зарождения и распространения трещины, знакомство с методом количественного описания усталостного разрушения и моделями роста трещины в том числе при нагружении с переменной амплитудой.2. Постановка целей и задач исследования.3. Экспериментальное исследование влияния единичной перегрузки на процесс роста усталостной трещины с использованием метода корреляции цифровых

	<p>изображений.</p> <p>4. Обсуждение и анализ результатов экспериментального и теоретического исследования.</p> <p>5. Дополнительные разделы: «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение», «Социальная ответственность».</p> <p>6. Заключение (выводы) по работе</p>
<p>Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)</p>	Презентация ВКР в Microsoft PowerPoint
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)</p>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Н.А. Гаврикова, старший преподаватель школы инженерного предпринимательства НИ ТПУ
Социальная ответственность	Т.А. Раденков, ассистент отделения контроля и диагностики НИ ТПУ
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
Реферат	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
--	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Инженер ЛМПКМ ИФПМ СО РАН	Еремин А.В.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Б41	Заречнев Владислав		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 79 с., 21 рис., 16 табл., 31 источник.

Ключевые слова: усталость металла, трещина, неоднородное нагружение, циклическое испытание, корреляция цифровых изображений.

Объектом исследования является процесс роста усталостной трещины в металлических материалах в условиях неоднородного нагружения.

Цель работы – проведение оценки параметров роста усталостной трещины при циклическом нагружении с приложением единичного цикла перегрузки.

В работе проводили исследование влияния перегрузки на процесс распространения усталостной трещины с применением метода корреляции цифровых изображений. Оценка проводилась на основе расчета скорости роста усталостной трещины и величины максимальной деформации.

В результате исследования было выявлено, что приложение цикла единичной перегрузки приводит к замедлению роста усталостной трещины при последующем нагружении. Анализ параметров показал, что при длине трещины равной 180 мкм скорость роста трещины и величина максимальной деформации в вершине принимают минимальные значения. Далее при распространении трещины степень влияния перегрузки снижается и не оказывает влияния после достижения длины 350 мкм.

Область применения: потенциальными потребителями результатов этого исследования являются предприятия машиностроительной отрасли.

Экономическая эффективность/значимость работы: исследование процессов роста усталостной трещины в перспективе может позволить сэкономить время, в частности, на диагностику самолетов различного назначения.

В будущем планируется рассмотреть наличие дополнительных факторов, которые не оценивались в данной работе. Например, остаточные напряжения, возникающие в вершине трещины, а также уровень закрытия.

ABSTRACT

Final qualifying work 79 p., 21 fig., 16 tabl., 31 references.

Keywords: metal fatigue, crack, variable amplitude loading, cyclic test, digital image correlation.

Object of investigation is the fatigue crack growth in metallic materials under variable amplitude loading.

The purpose of the study – assessment of the fatigue crack growth parameters under cyclic loading with the application of a single overload cycle.

The effect of overload on the process of fatigue crack growth was investigated by means of digital image correlation technique. The evaluation based on computation of two parameters – crack growth rate and maximum deformation.

It was found that the overload results in crack arrest under subsequent cycles with basic load level. The analysis of the parameters has shown that their minimum value was reached when crack length $a=180\ \mu\text{m}$. Further propagation leads to decrease of overload influence and finally its impact tends to zero at $a=350\ \mu\text{m}$.

Application: the results of this study could be applied in the field of mechanical engineering.

The prospects of the study are to consider the availability of additional factors that were not evaluated, for example, estimation of near-tip residual stresses, as well as the crack closure level.

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

Усталость – это процесс постепенного накопления повреждений в материале под действием циклических нагрузок, приводящий к изменению его свойств, образованию трещин и разрушению.

Выносливость – это свойство материала противостоять явлению усталости.

Усталостная долговечность – это число циклов нагружения, которое выдерживает материал перед разрушением при определенном напряжении.

Дислокация – это линейный дефект, который часто можно встретить в виде ряда вакансий или ряда межузельных атомов.

Напряжение – это удельная характеристика сил, возникающих в теле под действием внешних нагрузок.

Микроструктура – это характеристика металла, иллюстрирующая размер и форму зерен, взаимное расположение фаз, их форму и размеры.

Экстензометр – это прибор для измерения деформации образца во время проведения испытаний на растяжение, сжатие.

Корреляция цифровых изображений – это оптический метод, используемый для идентификации и отслеживания изменений цифровых изображений в двух (плоскость) и трех (трехмерный) координатах.

КИН – коэффициент интенсивности напряжений.

КЦИ – корреляция цифровых изображений.

КДУР – кинетическая диаграмма усталостного разрушения.

СРТУ – скорость роста трещины при усталости.

DIC – digital image correlation.

НТИ – научно-техническое исследование.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	10
1 Обзор литературы.....	13
1.1 Явление усталости металлов.....	13
1.2 Некоторые дислокационные механизмы зарождения трещин..	14
1.2.1 Механизм Мотта – Стро.....	15
1.2.2 Образование трещин путем пересечения плоскостей скольжения (механизм Коттрелла).....	16
1.2.3 Образование трещин путем скольжения дислокаций по искривленным плоскостям (механизм Инденбома).....	17
1.3 Напряжения при вершине трещины.....	17
1.4 Распространение трещины.....	21
1.4.1 Кинетическая диаграмма усталостного разрушения.....	22
1.5 Факторы, влияющие на усталостную долговечность.....	26
1.5.1 Микроструктура.....	27
1.5.2 Влияние методов обработки.....	28
1.5.3 Факторы внешней среды.....	28
1.5.4 Влияние спектра нагружения.....	29
1.5.5 Геометрия.....	30
1.6 Эффект закрытия трещины.....	30
1.7 Влияние перегрузки на рост трещины.....	33
2 Объект и методы исследования.....	36
2.1 Метод корреляции цифровых изображений.....	36
2.2 Порядок проведения испытания.....	38
3 Результаты проведенного исследования.....	40
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	45
4.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	45
4.2 SWOT – анализ.....	45

4.3	Планирование научно-исследовательских работ.....	49
4.3.1	Структура работ в рамках научного исследования.....	49
4.3.2	Определение трудоемкости выполнения работ.....	50
4.4	Бюджет научно-технического исследования (НТИ).....	54
4.4.1	Материальные затраты.....	54
4.4.2	Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ.....	55
4.4.3	Основная заработная плата исполнителей темы.....	57
4.4.4	Дополнительная заработная плата исполнителей темы.	57
4.4.5	Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	57
4.4.6	Накладные расходы.....	58
5	Социальная ответственность.....	61
5.1	Производственная безопасность.....	61
5.1.1	Анализ выявленных вредных факторов.....	62
5.1.2	Анализ выявленных опасных факторов.....	67
5.2	Экологическая безопасность.....	70
5.3	Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	71
5.4	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	72
	Заключение.....	75
	Список использованных источников.....	77

Введение

Поиск факторов, влияющих на процессы роста трещины при переменных нагрузках, начался ещё в начале XX века и продолжается в настоящее время. Процесс усталостного разрушения является сложным для прогнозирования и математического описания, в первую очередь, потому что он зависит от множества факторов, среди которых: амплитуда цикла, его асимметрия, параметры материала, последовательность прикладываемых нагрузок и многих других. Дополнительная сложность возникает при наличии нерегулярного нагружения, где величины закрытия трещины, а также остаточные напряжения в вершине трещины постоянно изменяются в зависимости от прикладываемых циклов перегрузки, недогрузки или их комбинаций. Среди величин, характеризующих усталость, особое место занимает коэффициент интенсивности напряжений или коэффициент трещиностойкости, который характеризует сопротивляемость усталости образца, в зависимости от его геометрии.

Существуют различные механизмы зарождения трещины, однако преимущественное положение занимают дислокационные, например, Мотта – Стро, Коттрелла. Повышенное внимание привлекает вершина трещины и процессы, происходящие вблизи нее. Ярким примером служит образование циклической и монотонной пластических зон [1].

Анализ процесса разрушения привел к появлению метода количественного описания и дал возможность готовить к обсуждению экспериментально наблюдаемые закономерности. Основная мысль состоит в том, что нагрузка, приложенная к телу, его геометрия и размеры макротрещины можно охарактеризовать одним параметром – коэффициентом K_I (индекс I служит описанием моды разрушения), который будет описывать поле деформаций и напряжений вблизи вершины трещины. С того момента приняли решение о представлении данных экспериментов о развитии усталостных трещин в виде кинетических диаграмм усталостного

разрушения (КДУР). Другое встречающееся название – диаграмма циклической трещиностойкости материала (ДЦТМ) [2].

Актуальность исследования заключается в применении его результатов в различных областях промышленности, например, в авиастроении. Авиация – одна из самых развитых областей инженерного дела. Однако усталость одного из элементов конструкции или двигателя представляет собой угрозу. Несчастных случаев, вызванных именно несовершенством конструирования – не так много. Гораздо чаще причиной аварии является усталость узлов систем передачи/генерации энергии. Авиационный двигатель часто находится в сложных рабочих условиях, что требует слаженной работы всех его компонентов. Их разрушение, как правило, приводит к внештатным ситуациям, когда воздушное судно частично или полностью повреждено. Также это влечет за собой потерю требуемых эксплуатационных свойств и гибель людей. Потенциальным источником разрушения может служить ошибка, допущенная как на этапе проектирования, так и во время технического обслуживания. Поэтому важно вовремя обнаружить появление усталостных дефектов (трещин), оценить их критичность, а также произвести расчет остаточного ресурса работы изделия с трещиной. Исходя из этого актуальным становится вопрос построения качественных теоретических моделей процессов роста усталостной трещины при неоднородном нагружении [3].

В случае неоднородного нагружения более важную роль начинают играть процессы, происходящие непосредственно в окрестности вершины трещины, а также впереди нее. Как известно, при приложении циклической нагрузки к образцу с трещиной у ее вершины возникают растягивающие и сжимающие напряжения, формируются соответствующие монотонной и циклические пластические зоны. Приложение периодических перегрузок/разгрузок существенно изменяют поведение трещины за счет изменения, как остаточных напряжений, так и влияния на процесс формирования циклической пластической зоны. Масштаб происходящих

изменений имеет порядок десятка микрометров, поэтому требуются точные и достоверные способы получения информации в процессе нагружения для исследования поведения материала у вершины растущей трещины.

Для изучения процесса распространения трещины предлагается использовать метод корреляции цифровых изображений (DIC) при фотографировании поверхности образца в режиме макросъемки (при большом увеличении). Преимущества такого подхода – это бесконтактность, наглядность, доступность, а также возможность получения данных непосредственно в процессе испытания.

Цель работы – проведение оценки параметров роста усталостной трещины при циклическом нагружении с приложением единичного цикла перегрузки.

Задачи:

1. провести аналитический анализ литературы по теме исследования;
2. на основе полученных теоретических данных провести расчет параметров усталостного испытания (нагрузка, асимметрия, периодичность съемки данных и др.) и разработать алгоритм его проведения;
3. провести испытание образца с регистрацией оптических изображений его поверхности в области вершины распространяющейся усталостной трещины;
4. провести обработку изображений с использованием метода корреляции цифровых изображений, выполнить расчет необходимых параметров роста трещины и проанализировать полученные результаты.

1 Обзор литературы

1.1 Явление усталости металлов

Усталость металла – это физический процесс, который характеризуется разрушением в условиях многократно повторяющихся нагрузок (чаще всего порядка $10^6 \div 10^7$ количества циклов), а в некоторых случаях даже и при меньших значениях (порядка 10^3 количества циклов). При дальнейшем изучении данного явления было введено понятие о выносливости металла. Выносливость – это способность металла противостоять усталостному разрушению. Грамотная оценка усталостной долговечности играет большую роль в эксплуатации конструкции.

Разрушение в результате усталости – причина поломки таких ответственных деталей, как гребные винты, шатуны моторов, коленчатые валы и многих других.

Усталость при переменном нагружении опасна тем, что влияние неблагоприятных факторов значительнее, чем при статическом нагружении; разрушение происходит внезапно, без поглощения значительной работы деформации. Необходимым и достаточным условием для формирования усталостного разрушения, является наличие повторяемости приложения нагрузки. Смена знака повторяющейся нагрузки дополнительно указывает на характер разрушения, но не является определяющим фактором [4].

В усталости, как в процессе, выделяют следующие стадии:

1. пластическая деформация – первоначальная стадия, до того как произошло образование первой трещины;
2. зарождение трещин;
3. развитие некоторых образовавшихся трещин и дальнейшее преобладание главной из них - магистральной;
4. разрушение по исчерпанию предела выносливости материала [5].

График, где по оси ординат откладываются значения прикладываемого напряжения, а по оси абсцисс – количество циклов до разрушения, называется кривой усталости или кривой Веллера, рисунок 1.

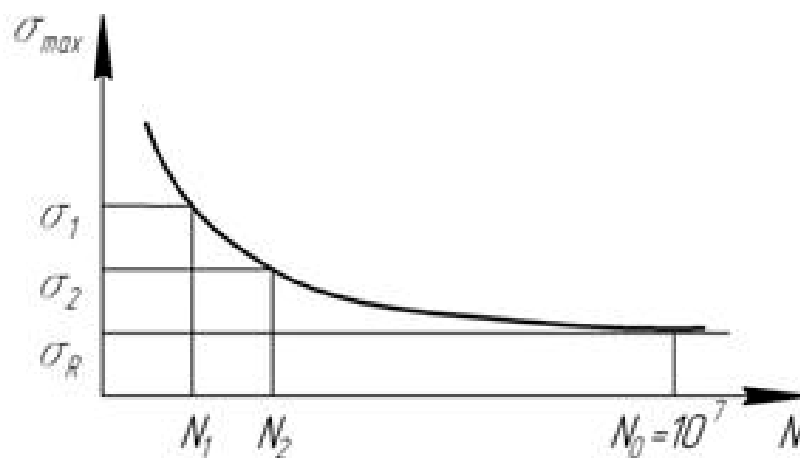


Рисунок 1 – Кривая усталости (Велера)

Горизонтальная асимптота на графике свидетельствует о том, что при определенном значении максимального напряжения цикла образец будет противостоять разрушению на протяжении, теоретически, бесконечно большого числа циклов. Это напряжение – предел выносливости материала, который обозначается как σ_R , где R – коэффициент асимметрии цикла [6].

1.2 Некоторые дислокационные механизмы зарождения трещин

Теория дислокаций предлагает различные механизмы зарождения трещин, вызываемые значительными внутренними напряжениями от дислокационных конфигураций, которые являются результатом пластической деформации, которая предшествует разрушению.

Общее во всех моделях то, что они описывают связь зарождения трещин с концентрацией упругой энергии при образовании скопления и дальнейшем сближении дислокаций. Момент образования трещины – это момент достижения максимальной плотности упругой энергии в отдельно

взятом объеме материала (таким образом, происходит достижение критической плотности дислокаций).

1.2.1 Механизм Мотта - Стро

По этому механизму трещина возникает вблизи головы скопления, прижатого к барьеру, рисунок 2, именно в этой области находится концентратор внутренних напряжений.

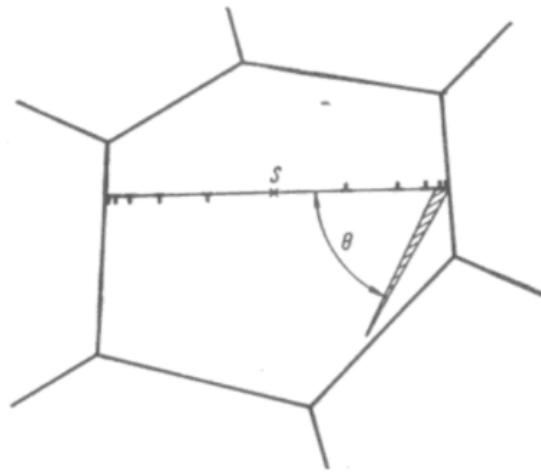


Рисунок 2 – Скопление дислокаций у границы зерна и трещина (штриховка);
 S – источник дислокаций [1]

Касательные напряжения τ вызывают скопление дислокаций в плоскости скольжения, а трещина зарождается в плоскости, проходящей через место действия максимального нормального напряжения σ_{\max} - голову скопления.

Стро отмечал, что по мере скопления краевых дислокаций в изотропной среде угол θ для плоскости с действующим σ_{\max} , будет равен $70^{\circ}30'$ и трещина появляется при:

$$\tau > \frac{3\pi^2 \cdot \alpha}{8n \cdot b}, \quad (1)$$

где n – количество дислокаций в скоплении;

b – вектор Бюргерса.

Можно сделать вывод, что чем меньше n , тем большее касательное напряжение требуется для образования трещины.

1.2.2 Образование трещин путем пересечения плоскостей скольжения (механизм Коттрелла)

Отличие от механизма рассмотренного выше в том, что в этом случае не требуется образования скопления из большого числа дислокаций и не предполагается наличие препятствий для этого скопления. Пусть в кристалле существуют две пересекающиеся плоскости скольжения A и B , в которых скользят единичные дислокации, рисунок 3.

При встрече этих дислокаций в точке пересечения K появляется «сидячая» краевая дислокация с вектором Бюргерса b , которая расположена вдоль линии пересечения плоскостей A и B . Экстраполуплоскость сидячей дислокации играет роль «клина» помещенного в кристалле. В тот момент, когда количество встретившихся дислокаций в точке K будет удовлетворять условию $\sigma \cdot n \cdot b = 2\alpha$, в плоскости, лежащей вдоль линии пересечения, будет образовываться трещина, рисунок 3, б).

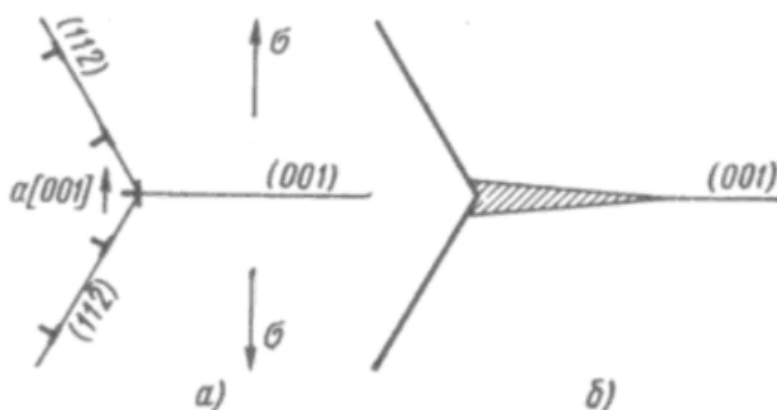


Рисунок 3 – Образование трещины при взаимодействии дислокаций в пересекающихся плоскостях скольжения [1]

1.2.3 Образование трещин путем скольжения дислокаций по искривленным плоскостям (механизм Инденбома)

В.Л.Инденбом предложил механизм зарождения трещин в кристаллических телах, испытавших пластическую деформацию. Он продемонстрировал идею о том, что при скольжении дислокаций по изогнутой плоскости по ходу пути скольжения сохраняются краевые дислокации с вектором Бюргерса, который перпендикулярен плоскости скольжения, рисунок 4.



Рисунок 4 – Скольжение дислокаций по криволинейной поверхности [1]

Перемещение n краевых дислокаций по фрагменту поверхности скольжения с кривизной $\chi = 1/R$ соответствует оставлению в этой области вертикального ряда краевых дислокаций с имеющейся плотностью $n \cdot \chi$. Когда дислокации достигают критической плотности, которая удовлетворяет условию $\sigma \cdot n \cdot b = 2\alpha$, то это вызывает зарождение трещины, лежащей в плоскости скольжения. Экспериментально данное расположение трещин наблюдалось в некоторых гексагональных кристаллах [1].

1.3 Напряжения при вершине трещины

Большая часть времени от жизненного цикла трещины приходится на ее развитие. Процесс этот достаточно сложен для описания. В самом начале стадии роста, когда зародышевая трещина имеет субмикроскопические размеры, может происходить ее разрастание за счет поступления вакансий,

возникающих в большом количестве при циклическом нагружении. В большинстве случаев впадины в полосах скольжения достигают такой глубины, при которой их последующее развитие может идти вследствие концентрации напряжений у дна впадины (вершины трещины) [5].

Существуют несколько типов трещин в твердом теле в зависимости от ее расположения относительно оси (плоскости) прикладываемой нагрузки, рисунок 5.

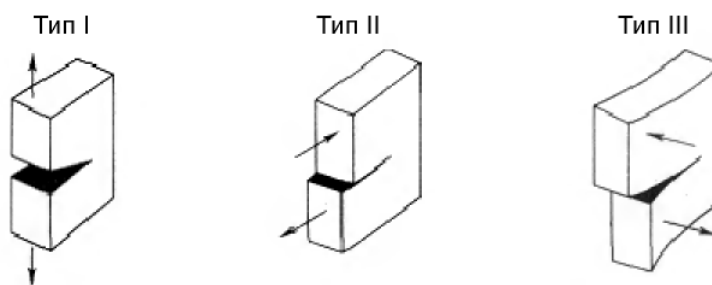


Рисунок 5 – Типы трещин в твердом теле (моды разрушения) [7]

При действии напряжений, перпендикулярных плоскости сечения, трещина ведет себя по типу I. Сдвиговой деформации соответствует поведение трещины по типу II. Трещина по типу III (срез) возникает в случае антиплоского сдвига: движение берегов трещины совпадает с плоскостью трещины. Наибольший интерес к изучению представляет поведение трещины по типу I.

В качестве примера приведем модель сквозной трещины, образовавшейся по типу I, длиной $2a$ в бесконечной пластине, рисунок 6.

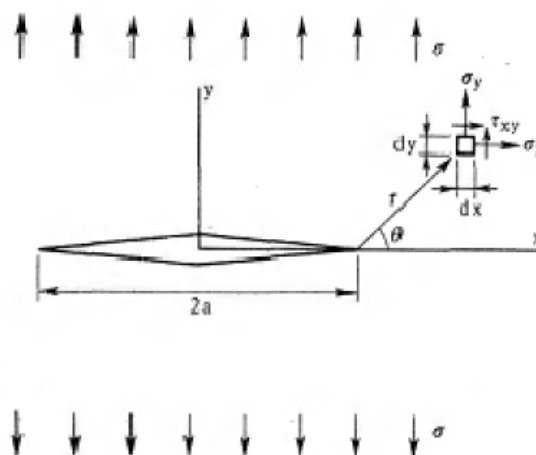


Рисунок 6 – Трещина в бесконечной пластине [7]

На пластину действует растягивающее напряжение σ , вызванное приложением бесконечных сил. Элемент $dxdy$ пластины, располагающийся на расстоянии r от вершины трещины и составляющий с плоскостью трещины угол θ , находится под влиянием нормальных напряжений σ_x и σ_y , действующих в направлениях x и y , и касательного напряжения τ_{xy} . Математически это можно записать в виде:

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right]; \\
 \sigma_y &= \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right]; \\
 \tau_{xy} &= \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}; \\
 \sigma_z &= 0 \text{ (плоское напряженное состояние);} \\
 \sigma_z &= \nu(\sigma_x + \sigma_y) \text{ (плоская деформация).}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Как и было предположено, в упругом случае напряжения, указанные в (2), пропорциональны σ . Численные значения их величин пропорциональны \sqrt{a} и устремлены к бесконечности в области вершины трещины при $r = 0$.

В группе уравнений (2) функции координат r и θ имеют простой вид. Запишем эту группу уравнений обобщенно:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta),
 \tag{3}$$

где $K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$;

$f_{ij}(\theta)$ - функция, зависящая от угла θ .

Собственно K_I - коэффициент интенсивности напряжений, где индекс I означает первую моду разрушения.

В зоне упругости трещины разной величины, но с идентичными K_I , имеют одинаковые поля напряжений. Также отмечается, что трещины в одинаковом материале, нагруженные до одинаковых значений K_I , обладают равными по размеру зонами пластичности. За пределами зоны пластичности поля напряжений будут одинаковыми. Отсюда следует, что деформации и напряжения внутри зоны пластичности – равны.

Таким образом, K_I есть мера всех деформаций и напряжений. Когда они в области вершины трещины достигают критических значений, осуществляется расширение трещины, т.е. при достижении K_I своего критического значения K_{Ic} - случится разрушение. Постулируем, что K_{Ic} является константой материала. Теоретически, используя эту константу, есть возможность рассчитать, к примеру, критический (приводящий к разрушению) размер трещины в образце, напряженном до определенного уровня [7].

В реальных условиях эксплуатации всё намного сложнее. Хотя бы взять тот факт, что на практике размер пластины будет иметь конечные пределы, и, следовательно, выражение для K_I запишем в виде:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f(a/W), \quad (4)$$

где W – ширина пластины;

$f(a/W)$ - функция, характеризующая собой пластину конечных размеров.

Безусловно, для определения K_{Ic} нужно знать функцию $f(a/W)$. Действительное значение K_{Ic} экспериментально можно получить в случае, когда перемещения точек пластины перпендикулярно ее плоскости достаточно малы (случай плоского деформирования), что можно наблюдать, когда пластина обладает необходимой толщиной. Если же деформации в

направлении под углом 90° к плоскости пластины ничем не ограничены (плоское напряженное состояние), то K_{Ic} напрямую зависит от толщины пластины.

Заключаем, что K_{Ic} - характеристика трещиностойкости материала. Также K_{Ic} называют «вязкостью разрушения при плоском деформированном состоянии» [7].

1.4 Распространение трещины

Коэффициент интенсивности напряжений (КИН) остается важной характеристикой до тех пор, пока размер пластической зоны мал. В таком случае можно полагать, что КИН определяет степень распространения трещины за цикл. Например, если две трещины имеют одинаковые значения коэффициента интенсивности напряжений, то и расти они должны с одной и той же скоростью.

При варьировании величины циклического нагружения от нуля до заданного положительного значения, изменение КИН лежит в интервале $\Delta K = K_{\max} \div K_{\min}$, где $K_{\min} = 0$. Отсюда следует, что распространение трещины за цикл при циклическом нагружении (скорость роста трещины) – величина, которая зависит от амплитуды ΔK :

$$da / dn = f(\Delta K) = f(2S_a \sqrt{\pi a}), \quad (5)$$

где S_a – амплитуда изменения напряжения [8].

Проанализируем результаты двух испытаний по продвижению трещины, рисунок 7, а.

Амплитуды изменения КИН в обоих испытаниях были постоянны и одинаковы. Величину ΔK можно получить с помощью выражения $\Delta K = 2S_a \sqrt{\pi a}$ с подстановкой требуемого значения a . На рисунке 7,б график зависимости скорости роста трещины от изменения КИН построен в логарифмических координатах по обеим осям.

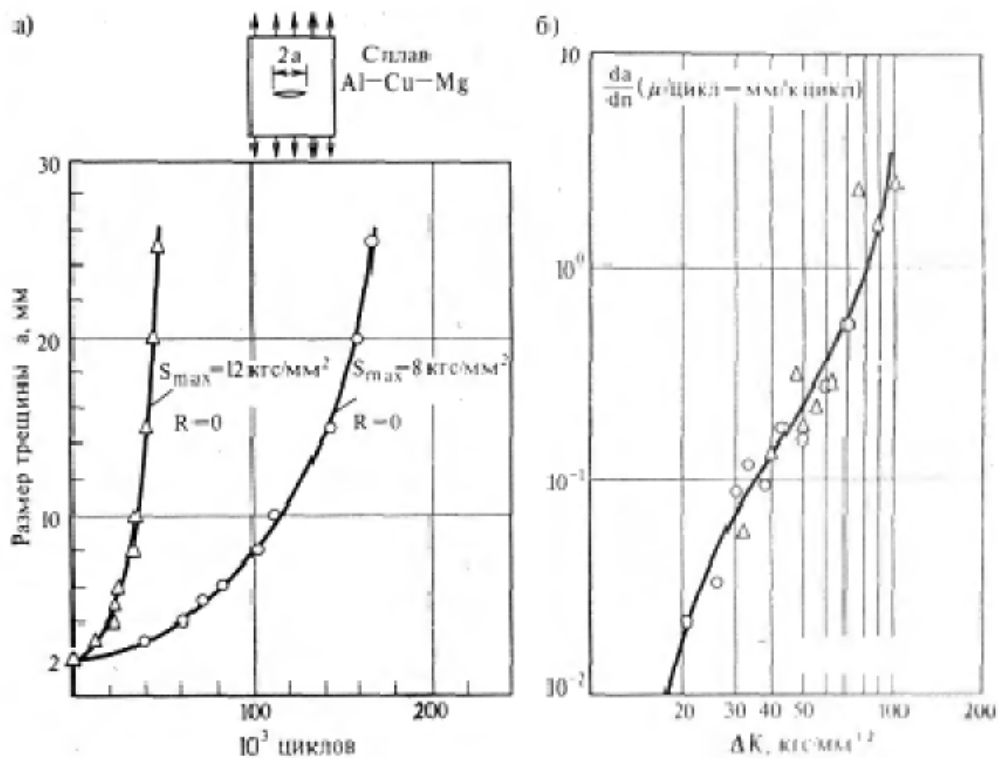


Рисунок 7 – Движение усталостной трещины: а – кривые роста трещины, б – скорость роста трещины [7]

Результаты, полученные при больших амплитудах изменений напряжений, свидетельствуют об относительно больших значениях ΔK и da/dn на старте процесса. В то же время, данные полученные при малых величинах ΔK и da/dn , достигают таких же больших значений, как и в первом испытании. Результаты испытаний расположились на одной кривой, что говорит о полезности уравнения (5) [7].

1.4.1 Кинетическая диаграмма усталостного разрушения

Диаграммы такого рода иллюстрируют зависимость скорости роста трещины $v = \Delta l / \Delta N$ (прирост Δl за соответствующее число циклов ΔN) от разности значений коэффициента интенсивности напряжений (КИН) за цикл (от размаха): $\Delta K = K_{I \max} - K_{I \min}$, или только значения $K_{I \max}$ [9]. Полные КДУР в логарифмических координатах $\lg v$, $\lg \Delta K$ являются S – образными

кривыми, которые, по оси X, ограничиваются двумя вертикальными асимптотами $\Delta K = \Delta K_{th}$ слева и $\Delta K = \Delta K_{fc}$ справа, где ΔK_{th} - то значение размаха КИН, ниже которого трещина не будет расти, а ΔK_{fc} - критическое значение ($K_{I_{max}}$), выше которого развивается неустойчивое лавинообразное разрушение, рисунок 8.

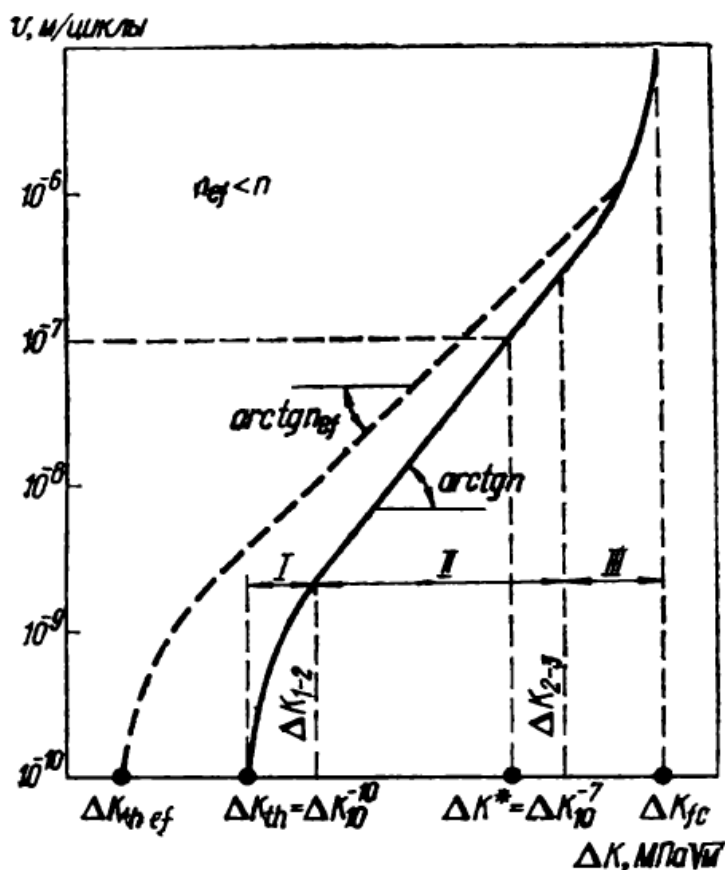


Рисунок 8 – Пример КДУР [2]

На диаграмме можно выделить три участка, которые согласно микроструктурным исследованиям соответствуют различным механизмам роста трещины. Первый участок, рисунок 8, с низкими скоростями роста трещины $v < v_{1-2}$, соответствует значениям ΔK близким к пороговым значениям ΔK_{th} . Несмотря на свой практический интерес, этот участок изучен мало, хотя на него приходится до 90 % живучести трещины. На этом этапе трещина растет скачкообразно, встречаются остановки в росте. В связи

с этим на первом участке отображают усредненные значения скорости роста трещины, который обычно лежат в пределах $\nu = 10^{-11} \dots 10^{-9}$ м/цикл. В этой части диаграммы типичный микрорельеф изломов – участки расслоения по плоскостям скольжения (вязкий скол) и строчечность. Иногда здесь можно увидеть скользящий механизм роста трещины.

Второй участок $\nu_{1-2} \leq \nu \leq \nu_{2-3}$ - прямолинейный, другое название – участок Пэриса. Участок назван в честь ученого, который с сотрудниками впервые выяснил [8], что интенсивность поля напряжений вблизи вершины трещины, которая характеризуется коэффициентом K_I , должна определять скорость ее роста, а затем предложил формулу:

$$\nu = C \cdot (\Delta K)^n, \quad (6)$$

где ν - скорость роста трещины;

C – размерный параметр, определяемый для каждого материала, определяет положение прямой относительно оси ординат при $\Delta K = 1$;

n – безразмерный параметр, определяемый для каждого материала, тангенс угла наклона прямой части участка;

K – коэффициент интенсивности напряжений, которая описывает прямолинейный участок КДУР. Позже для этого уравнения придумали более удобную форму:

$$\nu = C \cdot (\Delta K)^n = 10^{-7} \cdot \left(\frac{\Delta K}{\Delta K^*} \right)^n, \quad (7)$$

где ΔK^* - значение ΔK при $\nu = 10^{-7}$ м/цикл имеет размерность такую же, как у КИН и более конкретный физический смысл, чем C , размерность которой будет зависеть от n [10].

Протяженность участка Пэриса будет зависеть от условий опыта и материала образца. Чаще всего пределы второго участка от $\nu_{1-2} = 10^{-9} \div 10^{-8}$ м/цикл до $\nu_{2-3} = 5 \cdot 10^{-7} \div 5 \cdot 10^{-6}$ м/цикл. На этом участке диаграммы преобладает бороздчатый механизм роста трещины.

Третий участок кинетической диаграммы усталостного разрушения – участок быстрого роста трещины $\nu > \nu_{2-3}$ - криволинейная часть, которая вырождается в прямую по мере приближения значения ΔK к критическому ΔK_{fc} . Значение ΔK_{fc} , полученное в ходе циклических испытаний, может отличаться в отрицательную или положительную сторону от значения K_{Ic} , полученного в ходе статических испытаний. Этот участок также свидетельствует о скачкообразном развитии трещины [11]. Помимо этого для него характерны внутри- и межзеренный скол, а также ямочный рельеф. Это обусловлено размером пластической зоны у вершины трещины, который превышает структурный параметр материалов (размер зерна) и реализацией микромеханизмов, которые характерны для однократного статического нагружения. Кроме того, на первом и третьем участках КДУР скорость роста трещины в сильной степени зависит от микроструктуры, параметров нагружения и внешней среды [12].

Для аналитического описания полных кинетических диаграмм усталостного разрушения существуют несколько десятков зависимостей, наиболее общая из них:

$$\nu = A \cdot K_{I \max}^S \cdot (K_{I \max}^{m_1} - K_{th}^{m_2})^{m_3} / (K_{fc}^{m_4} - K_{I \max}^{m_4})^{m_5}, \quad (8)$$

где A , S , m_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5$) – некоторые постоянные для условий испытания и данного материала [13].

При оценке срока использования конструкции эти диаграммы имеют такое же значение, как и диаграммы растяжения при выяснении статической прочности. На основании КДУР определяют параметры циклической трещиностойкости материалов, по которым далее подбирают материалы для конструкций, оценивают влияние условий эксплуатации. При определенных допущениях по таким диаграммам есть возможность рассчитать оставшуюся продолжительность жизненного цикла конструкции с трещиной, т.е. количество циклов до разрушения, интегрируя уравнение:

$$N_2 = \int_{l_0}^{l_k} \frac{dl}{\nu} \cdot [K(l)], \quad (9)$$

где l_0, l_k - начальная и критическая длины трещины.

Усталостное разрушение как физический процесс – достаточно сложное явление, зависящее от различных факторов, которые необходимо выяснять. Подавляющее большинство из них – это характеристики циклической трещиностойкости, которые определяются по стандартам для различных видов испытаний. Это пороговое значение ΔK_{th}^* , критическое значение ΔK_{fc} , параметры C и n или ΔK^* и n . Дополнительно могут использовать значение ΔK при определенной скорости роста трещины. Чаще всего в качестве ΔK_{th} принимают значение ΔK при скорости роста трещины $\nu = 10^{-10}$ м/цикл. Для ΔK_{fc} единого мнения о выборе нет, но принято использовать момент начала скачкообразного развития трещины. Однако это явление характерно не для всех материалов. Судя по всему за ΔK_{fc} можно принимать значение ΔK при больших скоростях распространения трещины [11].

1.5 Факторы, влияющие на усталостную долговечность

Факторы, оказывающие влияние на усталостную долговечность, могут быть сгруппированы в следующие категории, рисунок 9:

- факторы микроструктуры материала (размер зерна, строение);
- обработка (предыстория деформирования, способ изготовления);
- спектр нагружения (знак, амплитуда, скорость, история нагружения);
- окружающая среда (температура, коррозионные среды);
- геометрические характеристики (качество поверхности, сварные соединения, толщина, надпилы).

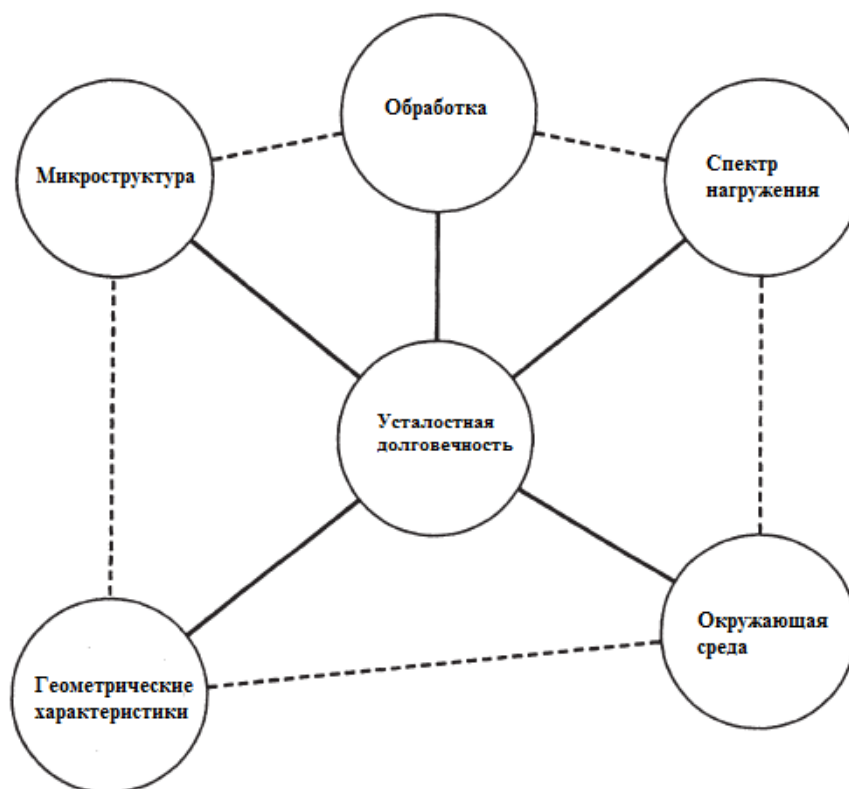


Рисунок 9 - Факторы, оказывающие влияние на усталостную долговечность элемента конструкции [14]

Обозначенные факторы влияния взаимосвязаны, однако степень оказываемого воздействия будет зависеть от многих условий.

1.5.1 Микроструктура

Структура зерен, средний размер зерна и микроструктурные дефекты оказывают значительное влияние на долговечность. Например, материал с малым размером зерна будет иметь большую долговечность при комнатной температуре, чем материал с большим размером зерен. Однако при повышенных температурах (ползучесть) больший размер зерна будет способствовать лучшему сопротивлению циклическим нагрузкам.

Повышение уровня поврежденности металлических материалов вызвано пластическими (необратимыми) деформациями, которые являются

следствием движения дислокаций. Следовательно, дислокационная структура оказывает существенное влияние на усталостные свойства [15].

1.5.2 Влияние методов обработки

Технологии обработки материалов, такие как ковка, прокатка и экструзия обеспечивают одинаковые свойства в заданном направлении согласно ориентации зерна. Усталостная долговечность обычно выше в продольном направлении и ниже – в поперечном. Данные виды обработки могут спровоцировать появление микродефектов, которые в дальнейшем могут стать очагами зарождения трещины.

Термическая обработка, поверхностное упрочнение, холодная и горячая деформация также оказывают влияние на усталостную долговечность. Например, в ходе производственных процессов в материале могут возникнуть остаточные напряжения. Остаточные напряжения сжатия на внешних поверхностях, как правило, повышают усталостную долговечность, в то время как растягивающие – снижают. Такие виды работ, как дробеструйная обработка, холодная прокатка способствуют возникновению остаточных напряжений сжатия.

1.5.3 Факторы внешней среды

Нахождение материала в коррозионной среде вызывает его деградацию, наиболее заметные дефекты – питтинг (точечная коррозия) или шероховатость поверхности. Участки, похожие на вырезы, выступают в роли концентраторов напряжений и часто являются источником зарождения трещины. Наиболее важные из них те, где активно проявляют себя плоскости скольжения. Различие в электрохимическом потенциале снаружи и внутри плоскости скольжения может способствовать процессу коррозии.

Известно, что циклическое нагружение усиливает коррозионный эффект путем продолжительного разрушения защитного оксидного слоя и обнажая следующие за ним слои материала, что ведет к распространению коррозионного влияния вглубь металла. Таким образом, коррозия способствует быстрому зарождению трещины. Как зарождение трещины, так и ее последующее распространение усиливается воздействием коррозионной среды. Например, коррозия может препятствовать закрытию трещины, тем самым увеличивая ее скорость роста [16]. Охрупчивание фронта трещины связано с диффузией водорода, которая наблюдается в области коррозионного воздействия [17]. С другой стороны, для некоторых материалов притупление вершины трещины, связанное с влиянием коррозии, может стать причиной снижения скорости распространения трещины. Без лишних преувеличений можно сказать, что водная среда сокращает требуемое время на зарождение трещины.

1.5.4 Влияние спектра нагружения

История, величина, знак и скорость нагружения влияют на усталостную долговечность. История нагружения может состоять как из заданных, так и из случайных значений нагрузки. В большинстве случаев нагрузка многоосная, т.е. это сочетание растяжения/сжатия, изгиба и кручения образца с результатом в виде многоосного напряженного состояния, которое изменяется вдоль и поперек образца. Влияние многоосного нагружения негативно сказывается на усталостной долговечности, в отличие от простого одноосного нагружения, за исключением случая чистого кручения.

Алгоритм для построения наиболее и наименее опасных историй нагружения из базы данных часто применяемых параметров нагружения был предложен Помпетци и Топпером [18]. Независимо от метода представления данных нагружения, как правило необходим анализ

напряжений для преобразования спектров нагружения в поля напряжений и деформаций для конкретного образца. Полученные таким образом поля используются для предсказания жизненного цикла изделия.

1.5.5 Геометрия

Чистота поверхности оказывает значительное влияние на зарождение трещины. Например, гладкие поверхности становятся шероховатыми в результате скольжения кристаллических плоскостей. Предварительно оказавшиеся на поверхности царапины или микровырезы могут вызвать раннюю локализацию деформации и таким образом снизить период зарождения трещины. Нарушения в геометрии образца, такие как впадины, вырезы могут выступать в роли концентраторов напряжений (или деформаций) и часто они входят в область зарождения трещины. В этой зоне напряжения и деформации имеют большую величину, чем номинальные приложенные напряжения (или деформации).

Рассмотрев только часть факторов, оказывающих влияние на зарождение и распространение усталостной трещины, можно заключить, что усталостное разрушение – это сложный процесс, который усложняется еще и тем, что материал может испытывать воздействие сразу нескольких факторов, при этом часть из которых трудно выявить или количественно оценить.

1.6 Эффект закрытия трещины

Среди факторов, оказывающих влияние на рост трещины, важную роль играет процесс закрытия. В процессе нагружения трещина, появившаяся в материале, может оставаться закрытой в вершине и некоторых её областях, «не чувствуя» приложения нагрузки. Само же открытие трещины происходит после прохождения уровня величины нагрузки, именуемого P_{op} [19]. Далее,

уже на пути снятия нагрузки, происходит закрытие трещины при значении нагрузки P_{cl} , близкому к P_{op} , рисунок 10.

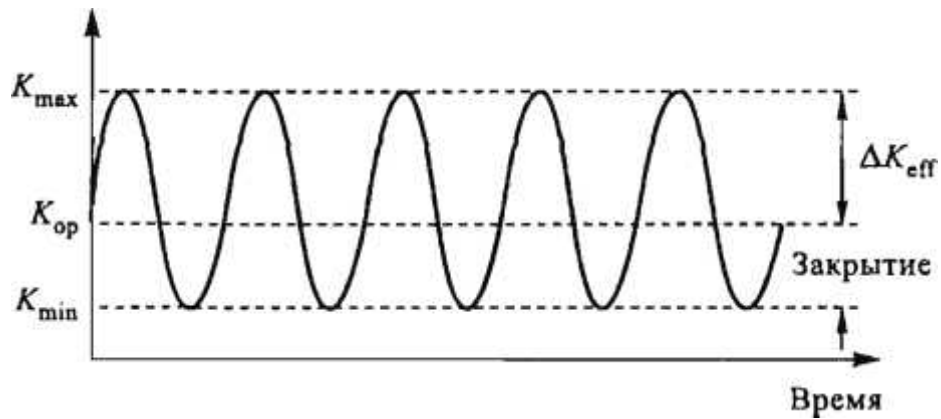


Рисунок 10 – Схема определения размаха ΔK_{eff} [20]

Можно сделать предположение о том, что та часть цикла нагружения, которая лежит ниже значения K_{op} не влияет на распространение усталостной трещины. Тогда делаем вывод о наличии эффективного размаха коэффициента интенсивности напряжений - ΔK_{eff} , величины, которая констатирует полную потерю контактов поверхностей трещины и может быть записана в виде:

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op}. \quad (10)$$

Механизмы закрытия усталостной трещины делятся на несколько видов в зависимости от воздействующего фактора, рисунок 11:

- закрытие, вызванное пластически деформированным материалом с остаточными напряжениями на берегах трещины;
- закрытие под воздействием коррозии;
- закрытие, связанное с наличием шероховатой поверхности на берегах трещины (проявляется преимущественно при нагружении по моде II);
- закрытие, вызванное фазовыми превращениями, вследствие чего происходит увеличение объема материала и рост местных напряжений

- закрытие вследствие вязкости среды.

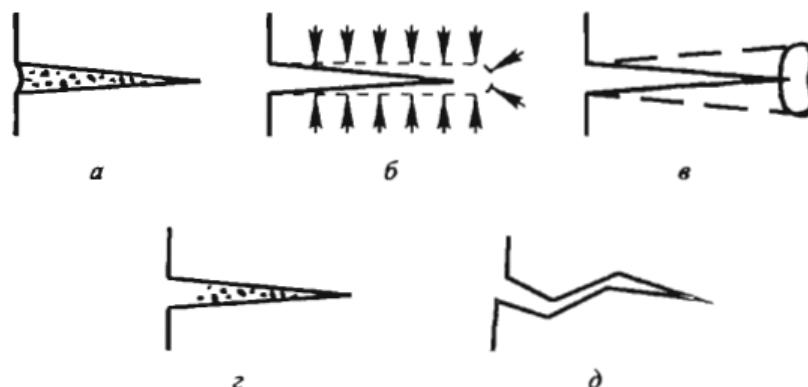


Рисунок 11 – Схемы механизмов закрытия трещины, сопряженные с факторами: а – вязкость среды, б - фазовые превращения, в – остатки пластически деформированного материала на поверхностях трещины, г – коррозия, д – наличие шероховатости [20]

Таким образом, на закрытие трещины оказывают влияние параметры испытания, окружающая среда, микроструктура материала. Влияние закрытия трещины на скорость роста больше всего проявляется на первом участке кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР) при асимметрии цикла $R \leq 0,7$. С ростом размаха ΔK (в области второго участка КДУР) влияние эффекта закрытия существенно снижается.

Скорость роста трещины с учетом закрытия трещины может быть рассчитана при помощи модифицированного уравнение Пэриса:

$$\frac{dl}{dN} = C \cdot (U \cdot \Delta K)^m. \quad (11)$$

Здесь под обозначением U имеется в виду коэффициент открытия трещины, который можно определить по следующему выражению:

$$U = \frac{\Delta K_{eff}}{\Delta K} = \frac{1}{1-R} - \frac{K_{op}}{\Delta K}. \quad (12)$$

Коэффициент открытия $U < 1$, если $K_{\min} < K_{op}$. В том случае, если $K_{\min} > K_{op}$, то $U = 1$ и эффекта закрытия трещины нет [21].

1.7 Влияние перегрузки на рост трещины

Рост трещин в конструкциях, нагружаемых с переменной амплитудой, происходит в условиях перегрузок или случайных нагрузок. К примеру, в материале, претерпевшем однократную перегрузку, рисунок 12, распространение трещины замедлилось, рисунок 13. Для характеристики этого явления воспользуемся моделью формирования пластической зоны в области вершины трещины, произошедшего в результате перегрузки.

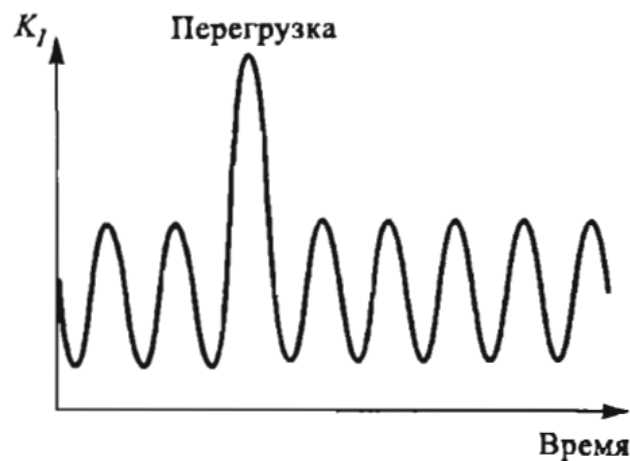


Рисунок 12 – Случай однократной перегрузки [7]

В ходе процесса нагружения у вершины трещины образуются две зоны: циклическая и монотонная. Как правило, размер циклической пластической зоны минимум в четыре раза меньше размера монотонной пластической зоны. Эти зоны по мере своего продвижения вслед за ростом трещины увеличиваются в размерах, оставляя след, который можно заметить, используя средства электронной микроскопии [7].

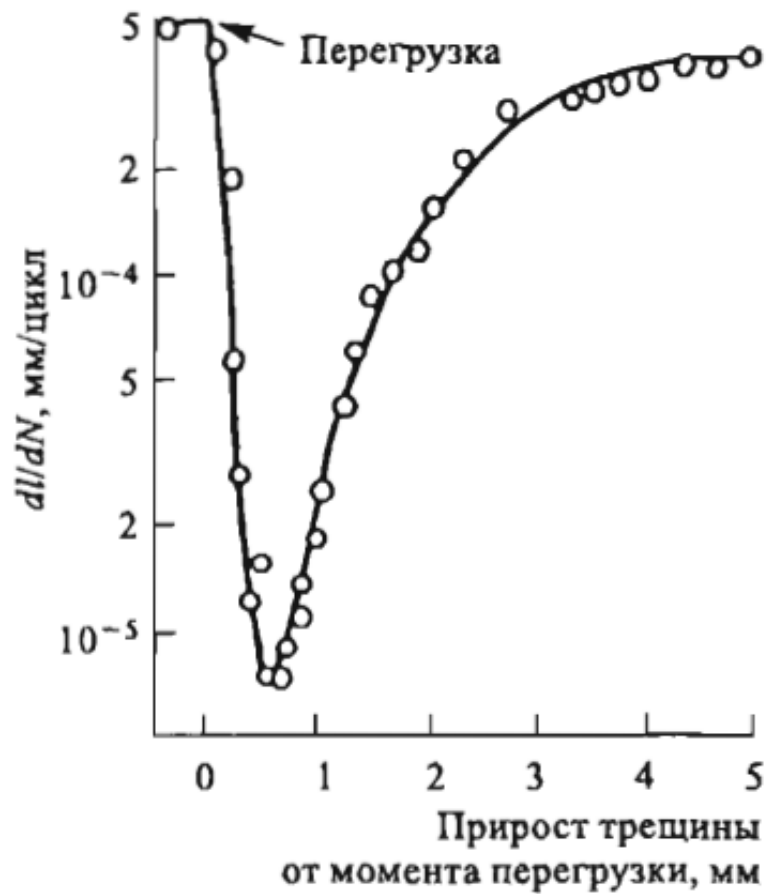


Рисунок 13 – Замедление скорости распространения усталостной трещины, вызванное однократной перегрузкой [7]

Рассматривая вопрос о замедлении роста трещины, О. Уиллер предложил сопоставлять размер монотонной пластической зоны и пластической зоны, вызванной перегрузкой. Предположено, что явление уменьшения скорости роста трещины имеет место быть до того момента, пока монотонная пластическая зона не достигнет границы «зоны перегрузки», рисунок 14 [20].

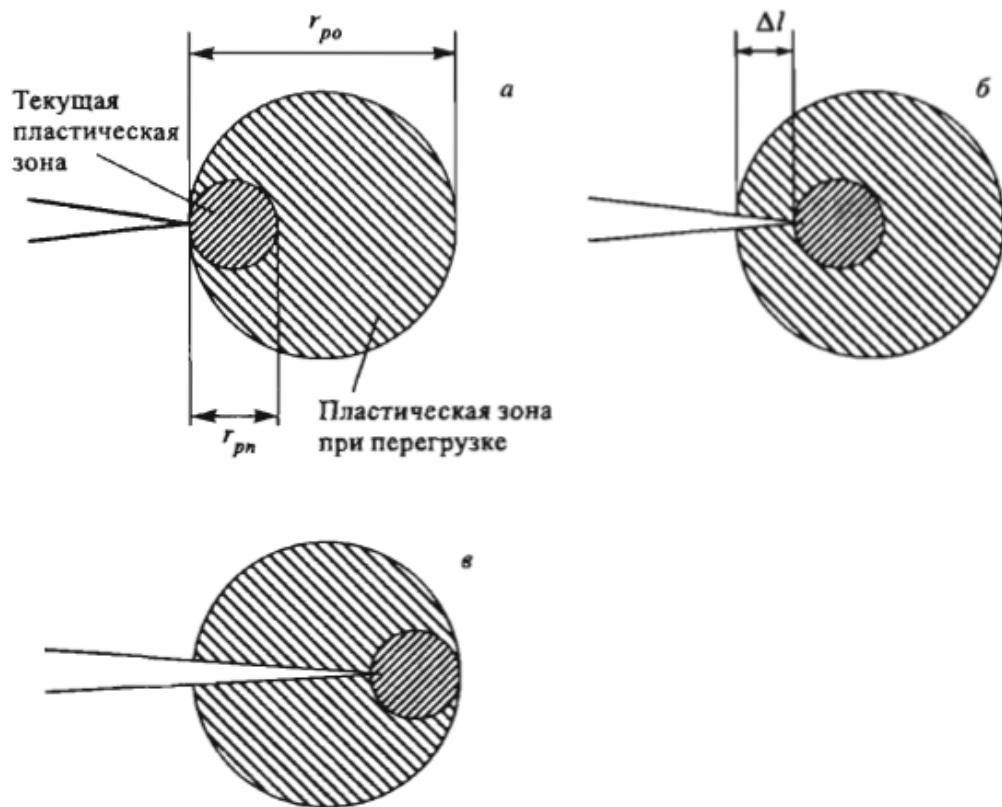


Рисунок 14 – Представление о влиянии «зоны перегрузки» на скорость роста усталостной трещины [20]

2 Объект и методы исследования

Для оценки параметров роста трещины при циклическом нагружении с единичной перегрузкой использовался плоский образец с боковым надпилком, рисунок 15, вырезанный электроэрозионной резкой из листа алюминиевого сплава Д16Т.

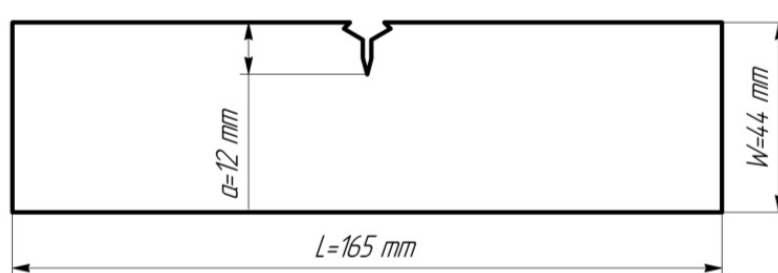


Рисунок 15 – Форма тестового образца

Для проведения испытания использовалось следующее оборудование:

- фотографирование поверхности проводилось оптической системой, состоящей из микроскопа Альтами MB0670 с закрепленной на него камерой Basler piA2400-17 разрешением 5Мп. Физический размер кадра при съемке составлял приблизительно 2,5 x 2 мм в масштабе 1.04 пиксел/мкм;

- циклическое нагружение осуществлялось с помощью сервогидравлической машины ViSS Nano 15 кН. Перед проведением испытания с фотографированием поверхности трещина предварительно проращивалась при частоте в 20 Гц.

2.1 Метод корреляции цифровых изображений

Метод корреляции цифровых изображений применяется для расчета значений деформации на поверхности образца. Его преимущества:

- бесконтактность измерения;
- обширный объем получаемых данных;

- идентификация точек максимального деформирования испытуемого образца.

Процесс расчета полей деформации заключается в вычислении смещений отдельных участков через задание взаимной корреляции по вычислению взаимно корреляционной функции и нахождению экстремума [22] по условию максимума коэффициента корреляции:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (I_{1,i,j} - \bar{I}_1)(I_{2,i,j} - \bar{I}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (I_{1,i,j} - \bar{I}_1)^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (I_{2,i,j} - \bar{I}_2)^2}}, \quad (13)$$

где I_1, I_2 – яркости элементов (пикселей) сопоставляемых участков сфотографированной поверхности образца, \bar{I}_1, \bar{I}_2 – среднеарифметические значения элементов тех же участков, n – размер стороны площадки, для которой рассчитывается коэффициент корреляции. Перемещая площадку размером $n \times n$, находится такое ее положение, при котором значение K достигает своей максимальной величины. Серия таких векторов образует поле векторов смещений (u, v) , дифференцируя которое, рассчитываются поля деформаций $(\partial u / \partial x, \partial u / \partial y, \partial v / \partial x, \partial v / \partial y)$.

Для работы с этим методом используется программа Vic 2D (Correlated Solutions). Этот программный пакет дает возможность применять виртуальный экстензометр, чтобы получить максимальные значения деформации ε в вершине трещины.

Принцип работы заключается в следующем: сначала проводится фотографирование процесса роста трещины в области ее вершины в течение всего испытания, рисунок 16, а. Далее отбираются фотографии контрольных циклов измерения для обработки в программе, рисунок 16, б, где строятся поля деформации в цветовой гамме, относящейся к соответствующим величинам. Затем производится подбор размеров и местоположения программного экстензометра, для наиболее точного снятия данных об отклике материала в области вершины трещины, рисунок 16, в. При

необходимости полученные данные можно отобразить в виде петли гистерезиса – общепринятым в механике разрушения изображении процесса нагружения, где по оси ординат откладываются значения нагрузки, полученные от датчика испытательной машины, а по оси абсцисс – полученные значения максимальной относительной деформации, рисунок 16, г.

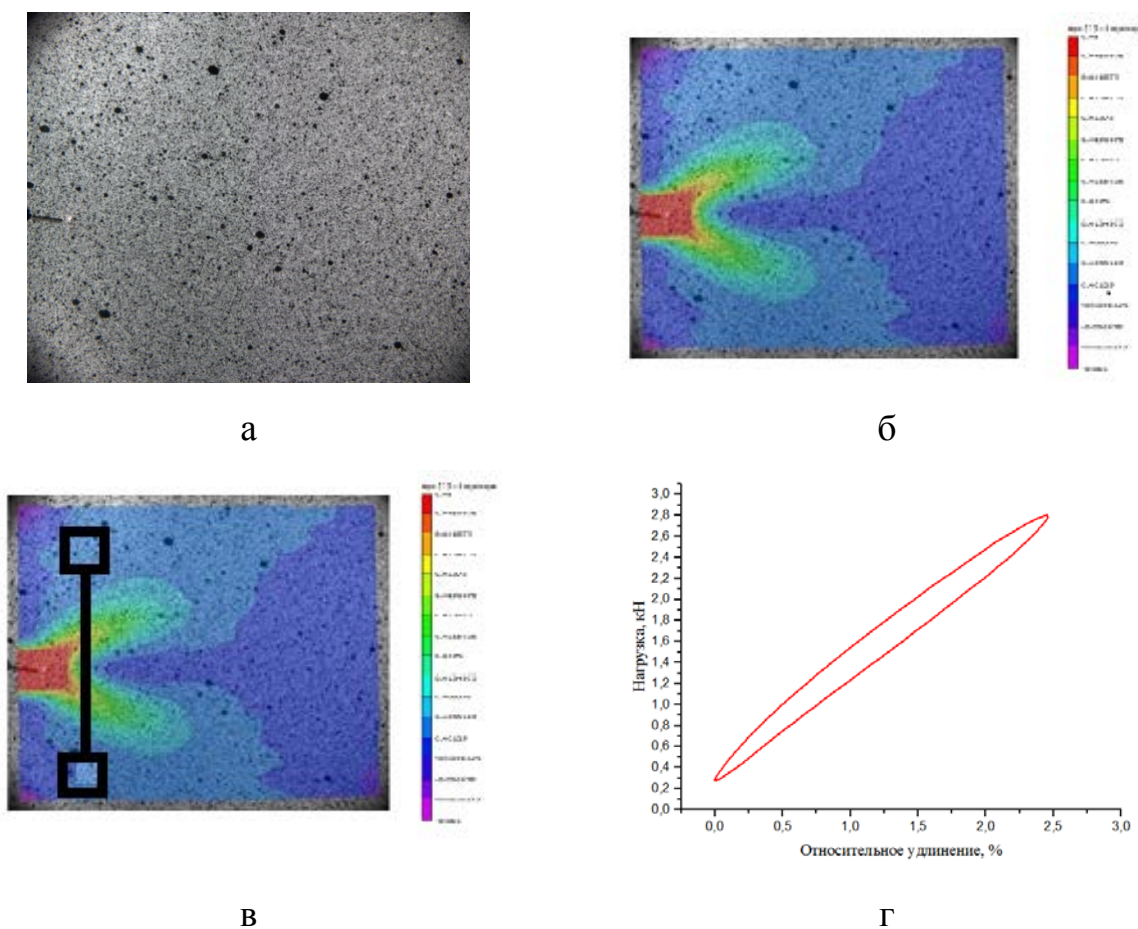


Рисунок 16 – Принципиальная схема работы метода корреляции цифровых изображений

2.2 Порядок проведения испытания

Параметры испытания: $P_{max}=2,5$ кН, $P_{min}=0,28$ кН, асимметрия $R=0,1$. Перегрузка $P_{ovL}=3,75$ кН. Длина трещины в эксперименте после

предварительного проращивания $a=14,5$ мм. Коэффициенты интенсивности $K_{max}= 12,86 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$, $K_{min}= 1,29 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$, $K_{OvL}=19,3 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$.

Схема проведения испытания и последовательность приложения нагрузок представлена на рисунке 17.

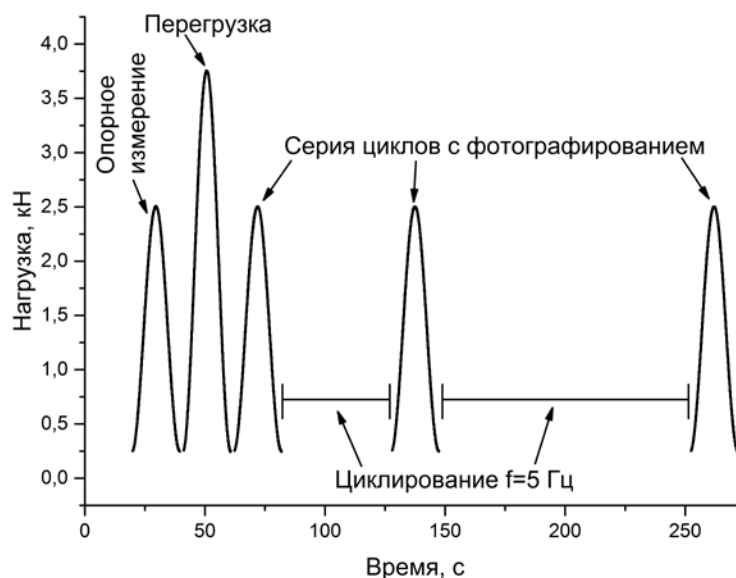


Рисунок 17 - Схема проведения испытания и последовательность приложения измерительных циклов и цикла перегрузки

Последовательность проведения эксперимента:

- после предварительного проращивания трещины приложили измерительный цикл, который должен показать реакцию образца до перегрузки в области трещины;

- далее приложили цикл перегрузки с амплитудой на 50% превышающей базовую;

- затем проводили измерения после 1, 2, 3, 10, 25, 100, 500, 4000, 10000, 15000, 24000, 28000, 37000 и 50000 циклов приложения нагрузки.

В измерительных циклах нагружение проводилось с частотой 0,05 Гц и параллельно велось фотографирование поверхности образца со скоростью 3 кадра в секунду. Между измерительными циклами прикладывалось базовое циклическое нагружение с частотой 5 Гц.

Полученные фотографии далее подверглись обработке при помощи метода корреляции цифровых изображений.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа 4Б41	ФИО Заречнев Владислав
-----------------------	----------------------------------

Инженерная школа	ИШНПТ	Отделение	Материаловедения
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Материаловедение и технологии материалов

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	- Инициатор проекта ИФПМ СО РАН; - В исследовании задействовано 2 человека: инженеры 1 и 4 квалификационной категории соответственно.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	- Проект выполняется в соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов»; - Минимальный размер оплаты труда в 2018 году составляет 9489 рублей.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	- Согласно п.3 п.п.16 ст. 149 НК РФ данная НИИ не подлежит налогообложению. На основании п. 1 ст. 58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году вводится пониженная ставка для расчета отчислений во внебюджетные фонды – 27,1% от фонда оплаты труда.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	- Технико-экономическое обоснование научно-исследовательской работы; - Потенциальные потребители результатов исследования; - SWOT-анализ НИИ.
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	- Планирование комплекса работ по проведению НИИ; - Расчет бюджета затрат на НИИ.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>Матрица SWOT</i>
2. <i>График проведения и бюджет НИ</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	15.03.18
---	----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ШИП	Гаврикова Надежда Александровна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Б41	Заречнев Владислав		

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Данное научное исследование не имеет коммерческого потенциала, поскольку является инициативным проектом в рамках научно-исследовательской работы для ИФПМ СО РАН, но обладает значительным инновационным потенциалом, заключающимся в том, что исследование процессов роста усталостной трещины в перспективе может позволить сэкономить время, в частности, на диагностику самолетов различного назначения.

Потенциальными потребителями результатов этого исследования являются предприятия машиностроительной отрасли, расположенные на территории Российской Федерации, включающие в себя судостроительные, автомобильные, авиакосмические, железнодорожные, оборонно-промышленные комплексы и т.д. В частности, применение результатов исследования в авиационной промышленности: выяснение факторов, влияющих на рост трещины и дальнейший прогноз о работоспособности применяемых материалов.

4.2 SWOT – анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта, оценку его внешней и внутренней среды.

Данный тип анализа позволяет оценить факторы и явления, способствующие или препятствующие продвижению на рынок.

На первом этапе необходимо описать сильные и слабые стороны проекта, возможности для реализации, угрозы, на которые необходимо обратить внимание (таблица 2).

Таблица 2 – Матрица SWOT – анализа

Сильные стороны	Слабые стороны
<p>С1.Перспективность исследования процессов роста усталостной трещины с помощью метода корреляции цифровых изображений.</p> <p>С2.Методика, описанная в работе, несет в себе экономичность и ресурсоэффективность – например, с ростом автоматизации процесса (в перспективе – создание отдельного прибора), уменьшатся время и денежные затраты на диагностику самолета.</p> <p>С3.Дальнейшее рассмотрение вопросов применения данной методики к другим материалам.</p> <p>С4.Наличие опытного руководителя.</p>	<p>Сл1.Завышенные требования к оборудованию, т.к. для проведения эксперимента требуются сложные испытательные установки.</p> <p>Сл2. Возможность появления и развития других методов оценки роста усталостной трещины, из существующих – метод конечных элементов, использование фрактографии.</p> <p>Сл3. Многостадийность методики и малая доля автоматизации.</p> <p>Сл4.Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой.</p>
Возможности во внешней среде	Угрозы внешней среды
<p>В1.Отсутствие языковых барьеров для продвижения исследования.</p> <p>В2.Применение результатов не только на российских, но и на мировых предприятиях.</p> <p>В3.Интеграция результатов исследования в различные области промышленности.</p>	<p>У1.Теоретическая возможность создания менее затратной методики исследования.</p> <p>У2.Отсутствие спроса на данную методику из-за уверенности предприятий в собственных средствах контроля.</p> <p>У3.Ослабление промышленного сектора, в частности, машиностроения, авиационной промышленности.</p>

Второй этап представляет собой обзор, насколько слабые и сильные стороны проекта соответствуют возможностям внешней среды, а также угрозам из неё. Анализ такого рода призван обратить внимание на возможность переоценки потенциала проекта (таблицы 3,4,5,6).

Таблица 3 – Сопоставление сильных сторон с возможностями проекта

Возможности проекта		C1	C2	C3	C4
	B1	+	0	+	+
	B2	+	+	+	0
	B3	+	+	+	0

Коррелирование сильных сторон и возможностей запишем в виде:
 В1С1С3С4, В2В3С1С2С3.

Таблица 4 – Сопоставление слабых сторон с возможностями проекта

Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
	В1	0	0	+	0
	В2	0	+	-	+
	В3	0	+	-	+

Коррелирование слабых сторон и возможностей запишем в виде:
 В1Сл3, В2В3Сл2Сл4.

Таблица 5 – Сопоставление сильных сторон проекта с угрозами

Угрозы внешней среды		С1	С2	С3	С4
	У1	+	+	0	0
	У2	+	0	0	0
	У3	0	-	-	0

Коррелирование сильных сторон с угрозами внешней среды запишем
 в виде: У1С1С2, У2С1.

Таблица 6 – Сопоставление слабых сторон с угрозами внешней среды

Угрозы внешней среды		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
	У1	-	+	-	-
	У2	0	-	+	+
	У3	0	-	0	0

Коррелирование слабых сторон с угрозами внешней среды запишем в
 виде: У1Сл2, У2Сл3Сл4.

Далее мы составляем итоговую матрицу SWOT – анализа (таблица 7).

Таблица 7 – Итоговая матрица SWOT – анализа

	<p>Сильные стороны:</p> <p>С1.Перспективность исследования процессов роста усталостной трещины с помощью метода корреляции цифровых изображений.</p>	<p>Слабые стороны:</p> <p>Сл1.Завышенные требования к оборудованию, т.к. для проведения эксперимента требуются сложные испытательные установки.</p>
--	--	---

Продолжение таблицы 7

	<p>С2.Методика, описанная в работе, несет в себе экономичность и ресурсоэффективность – например, с ростом автоматизации процесса (в перспективе – создание отдельного прибора), уменьшатся время и денежные затраты на диагностику самолета. С3.Дальнейшее рассмотрение вопросов применения данной методики к другим материалам. С4.Наличие опытного руководителя.</p>	<p>Сл2. Возможность появления и развития других методов оценки роста усталостной трещины, из существующих – метод конечных элементов, использование фрактографии. Сл3.Многостадийность методики и малая доля автоматизации. Сл4.Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой.</p>
<p>Возможности во внешней среде: В1.Отсутствие языковых барьеров для продвижения исследования. В2.Применение результатов не только на российских, но и на мировых предприятиях. В3.Интеграция результатов исследования в различные области промышленности.</p>	<p>Научная новизна изучения трещиностойкости с помощью метода корреляции цифровых изображений благоприятно сказывается на востребованности проводимого исследования в различных отраслях промышленности. Результаты работы легко изложить на английском языке, что дает возможность получить отклик мирового сообщества.</p>	<p>Высокие требования к оборудованию могут стать препятствием к востребованности результатов исследования. Отсутствие квалифицированных кадров также создает проблемы для продвижения в промышленность нового метода.</p>
<p>Угрозы внешней среды: У1.Теоретическая возможность создания менее затратной методики исследования. У2.Отсутствие спроса на данную методику из-за уверенности предприятий в собственных</p>	<p>Снижение объемов промышленного производства поставит под вопрос потребность в новых методах исследования. Наиболее защищенной отраслью, где могут понадобиться результаты работы, является дефектоскопия воздушных судов.</p>	<p>Основной угрозой для проводимого исследования является отсутствие интереса со стороны промышленности, так как эта работа является начальным этапом в технологии изучения трещиностойкости методом корреляции цифровых изображений и не имеет коммерческого потенциала. Однако, по окончании исследования, коммерческий потенциал возрастет, так как результаты работы позволят</p>

Продолжение таблицы 7

<p>средствах контроля. УЗ.Ослабление промышленного сектора, в частности, машиностроения, авиационной промышленности.</p>		<p>испытывать практически любой материал.</p>
--	--	---

Таким образом, резюмируем, что на жизнеспособности проекта благоприятно сказывается отсутствие языковых барьеров для публикации результатов в высокорейтинговых журналах. В первую очередь апробация методики планируется в авиационной промышленности. Среди рисков выступает нехватка квалифицированных кадров, что требует привлечение студентов для работы с предлагаемой методикой уже на этапе обучения в ВУЗе. В частности, следует обратить внимание на те образовательные программы, в перечне дисциплин которых содержится курс «Механика разрушения».

4.3 Планирование научно-исследовательских работ

4.3.1 Структура работ в рамках научного исследования

Составим перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования с распределением исполнителей по видам работ (таблица 8).

Таблица 8 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ работы	Содержание работы	Должность исполнителя
Разработка ТЗ на проектирование	1	Составление технической записки для НТИ	Еремин А.В. – инженер (квалификационный уровень - 4), Заречнев В.В. – инженер (квалификационный уровень - 1).

Продолжение таблицы 8

Выбор направления исследования	2	Изучение методики применения метода корреляции цифровых изображений	Заречнев В.В.
	3	Выбор материала для проведения эксперимента	Заречнев В.В.
	4	Планирование проведения эксперимента по испытанию алюминиевого сплава.	Еремин А.В., Заречнев В.В.
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Установка и настройка необходимого оборудования.	Еремин А.В., Заречнев В.В..
	6	Испытание алюминиевого сплава Д16Т	Заречнев В.В.
	7	Анализ полученных результатов, исследование процессов роста усталостной трещины в сплаве Д16Т, выводы	Заречнев В.В.
Обобщение и оценка результатов	8	Оценка эффективности полученных результатов	Еремин А.В., Заречнев В.В.
	9	Составление пояснительной записки	Заречнев В.В.

4.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Расчет трудоемкости осуществляется опытно-статистическим методом, основанным на определении ожидаемого времени выполнения работ в человеко-днях по формуле:

$$t_{ож\ i} = \frac{3 \cdot t_{\min i} + 2 \cdot t_{\max i}}{5}, \quad (15)$$

где $t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, чел.-дн.;

$t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Рассчитаем значение ожидаемой трудоёмкости работы:

Для установления продолжительности работы в рабочих днях используем формулу:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i}, \quad (16)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ож i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Для удобства построения календарного план-графика, длительность этапов в рабочих днях переводится в календарные дни и рассчитывается по следующей формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (17)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения одной работы, календ. дн.;

T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности, предназначен для перевода рабочего времени в календарное.

Коэффициент календарности рассчитывается по формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{КГ}}}{T_{\text{КГ}} - T_{\text{ВД}} - T_{\text{ПД}}}, \quad (18)$$

где $T_{\text{КГ}}$ – количество календарных дней в году, 365;

$T_{\text{ВД}}$ – количество выходных дней в году, 52;

$T_{пд}$ – количество праздничных дней в году, 14.

Определим длительность этапов в рабочих днях и коэффициент календарности:

$$k_{кал} = \frac{T_{КГ}}{T_{КГ} - T_{ВД} - T_{ПД}} = \frac{365}{365 - 50 - 14} = 1,22. \quad (19)$$

Также следует учесть, что рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} необходимо округлить до целого числа. Результаты расчетов сведем в таблицу 9.

Таблица 9 - Временные показатели проведения научного исследования

№ раб.	Исполнители	Продолжительность работ				
		t_{min} чел- дн.	t_{max} чел-дн	$t_{ож}$ чел-дн	T_p раб.дн	T_k кал.дн
1	Еремин А.В. – инженер (квалификационный уровень - 4), Заречнев В.В. – инженер (квалификационный уровень - 1).	1	3	2	1	2
2	Заречнев В.В.	16	36	24	24	30
3	Заречнев В.В.	6	14	10	10	13
4	Еремин А.В., Заречнев В.В.	4	14	8	4	5
5	Еремин А.В., Заречнев В.В.	10	25	16	8	10
6	Заречнев В.В.	4	16	9	9	11
7	Заречнев В.В.	4	14	8	8	10
8	Еремин А.В., Заречнев В.В.	1	10	5	3	4
9	Заречнев В.В.	2	14	7	7	9
						94

Итого: для руководителя – 11 рабочих дней, для студента – 83 рабочих дня.

По данным таблицы 9 строится календарный план-график. График строится с разбивкой по месяцам и по неделям (7 дней) за период времени дипломирования (таблица 10).

Таблица 10 – Календарный план-график проекта

Этапы	Вид работы	Исполнители	T_k	Февраль	Март	Апрель	Май
1	Составление технической записки для НТИ	Еремин А.В. – инженер (квалификационный уровень - 4), Заречнев В.В. – инженер (квалификационный уровень - 1).	2	■			
2	Изучение методики применения метода корреляции цифровых изображений	Заречнев В.В.	30	■			
3	Выбор материала для проведения эксперимента	Заречнев В.В.	13		■		
4	Планирование проведения эксперимента по испытанию алюминиевого сплава	Еремин А.В., Заречнев В.В.	5		■		
5	Установка и настройка необходимого оборудования	Еремин А.В., Заречнев В.В.	10		■		
6	Испытание алюминиевого сплава Д16Т	Заречнев В.В.	11			■	
7	Анализ полученных результатов, исследование процессов роста усталостной трещины в сплаве Д16Т, выводы	Заречнев В.В.	10				■

Таблица 11 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб. [23], [24]	Затраты на материалы, руб.
Образцы из сплава Д16Т	кг	0,2	500 руб. за 1 кг	100
Наждачная бумага	м ²	2,5	120 руб. за 1 м ²	300
Итого				424

Итог рассчитываем по формуле:

$$Z_M = (1 + K_T) \cdot \sum_{i=1}^m \mu_i \cdot N_{pi}, \quad (20)$$

где K_T - коэффициент транспортно – заготовительных расходов, %,

$$K_T = 0,06;$$

N_{pi} - норма расхода i – того материала;

μ_i - цена единицы ресурса.

Тогда:

$$Z_M = (1 + 0,06) \cdot (100 + 300) = 424 \text{ руб.} \quad (21)$$

4.4.2 Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

Для проведения научно-исследовательской работы требуются следующие виды оборудования: установка для испытаний ViSS Nano 15kN, датчик раскрытия Vi-06-201, зеркальная фотокамера Canon 750D, объектив Canon EF 70-300mm, ноутбук. Лаборатория МПКМ ИФПМ СО РАН располагает вышеперечисленным оборудованием, поэтому необходимо только рассчитать величину отчислений на амортизацию того оборудования, стоимость которого превышает 100000 рублей (таблица 12).

Таблица 12 - Расчет величины амортизационных отчислений

Тип оборудования	Стоимость, руб.	Срок эксплуатации, лет	Срок использования в НТИ, кал.дн.	Амортизационные отчисления, руб.
Установка для испытаний ViSS Nano 15kN (А)	4900000	10	21	28191,78
Датчик раскрытия Vi-06-201 (Б)	150000	10	21	863,01

Величину амортизации рассчитаем по формуле:

$$I_{\text{ам. обор}} = \left(\frac{T_{\text{исп. обор}}}{365} \right) \cdot K_{\text{обор}} \cdot N_a, \quad (22)$$

где $T_{\text{исп. обор}}$ – время использования оборудования;

365 дней – количество дней в году;

$K_{\text{обор}}$ – стоимость оборудования;

N_a – норма амортизации.

$$N_a = \frac{1}{T_{\text{с.с. обор}}}, \quad (23)$$

где $T_{\text{с.с. обор}}$ – срок службы оборудования.

Тогда для оборудования А:

$$N_a = \frac{1}{10} = 0,1; \quad (24)$$

$$I_{\text{ам. обор}} = \left(\frac{21}{365} \right) \cdot 4900000 \cdot 0,1 = 28191,78 \text{ рублей.} \quad (25)$$

Для оборудования Б:

$$N_a = \frac{1}{10} = 0,1; \quad (26)$$

$$I_{\text{ам. обор}} = \left(\frac{21}{365} \right) \cdot 150000 \cdot 0,1 = 863,01 \text{ рубля.} \quad (27)$$

4.4.3 Основная заработная плата исполнителей темы

$$Z_{\text{пр}} = \frac{Z_{\text{м}}}{n} \cdot t_i, \quad (28)$$

где $Z_{\text{м}}$ - зарплата по окладу, руб. [25];

n - количество рабочих дней в месяце (при 5-дневной рабочей неделе – 21 день);

t_i - занятость в исследовании, раб. дни.

Тогда:

$$Z_{\text{принженера 4 кв. уровня}} = \frac{16131}{21} \cdot 11 = 8449,57 \text{ рублей}; \quad (29)$$

$$Z_{\text{принженера 1 кв. уровня}} = \frac{9489}{21} \cdot 83 = 37504,14 \text{ рублей}. \quad (30)$$

4.4.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

12 % - от основной заработной платы. Тогда:

$$\text{Доп. } Z_{\text{принженера 4 кв. уровня}} = 1013,95 \text{ рублей};$$

$$\text{Доп. } Z_{\text{принженера 1 кв. уровня}} = 4500,49 \text{ рублей}.$$

4.4.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды для ТПУ составляют 27,1 % от ($Z_{\text{пр}} + \text{Доп. } Z_{\text{пр}}$). Тогда:

$$\text{Отчисления инженера 4 кв. уровня} = 2564,61 \text{ рублей};$$

$$\text{Отчисления инженера 1 кв. уровня} = 11383,26 \text{ рублей}.$$

4.4.6 Накладные расходы

Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{\text{нр}}, \quad (31)$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

Тогда:

$$Z_{\text{накл}} = 94894,81 \cdot 0,16 = 15183,17 \text{ рублей.} \quad (32)$$

Итоги расчета бюджета сводим в смету затрат (таблица 13).

Таблица 13 – Смета затрат научно-технического исследования

Виды затрат	Сумма затрат, руб.
Материальные затраты	424
Амортизация оборудования	29054,79
Затраты на оплату труда исполнителей темы	51468,15
Отчисления на социальные нужды	13947,87
Накладные расходы	15183,17
Общие затраты	110077,98

По итогам работы над разделом установлено следующее: в исследовании задействованы два инженера – первой и четвертой квалификационной категории соответственно. Затраты на НТИ составили 110077,98 рублей. Сумма получилась относительно небольшая, за счет приобретенного заранее специального оборудования. На проведение исследования запланировано 94 рабочих дня.