

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт Физики Прочности и Материаловедения  
Сибирского отделения Российской академии наук  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский Политехнический Университет»

На правах рукописи

Еремин Александр Вячеславович

**Мониторинг оптическим и акустическим методами состояния  
армированных полимерных и металлических материалов  
при усталостном разрушении**

Специальность 05.11.13 — Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ, материалов и изделий

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Панин Сергей Викторович

Томск — 2018

## Оглавление

	Стр.
<b>Введение</b> . . . . .	7
<b>Глава 1. Обзор литературы</b> . . . . .	17
1.1 Общие понятия усталостного разрушения материалов . . . . .	17
1.1.1 Предел выносливости и кинетическая диаграмма усталостного разрушения . . . . .	17
1.1.2 Пластические зоны у вершины усталостной трещины . . . . .	20
1.1.3 Влияние перегрузки на рост трещины . . . . .	22
1.1.4 Усталость композиционных материалов . . . . .	24
1.2 Применение волн Лэмба для оценки деградации состояния (поврежденности) композиционных материалов при циклическом нагружении . . . . .	26
1.2.1 Понятие о встроенном контроле состояния . . . . .	26
1.2.2 Актуальность использования концепции SHM . . . . .	27
1.2.3 Современные тенденции в разработки систем оценки состояния . . . . .	31
1.2.4 Использование волн Лэмба для оценки состояния материалов . . . . .	31
1.3 Применение метода корреляции цифровых изображений для исследования процессов усталости материалов . . . . .	35
1.3.1 Общие понятия метода корреляции цифровых изображений	35
1.3.2 Оценка параметров деформирования, роста трещины и разрушения материалов с использованием метода корреляции цифровых изображений . . . . .	37
1.4 Постановка задачи исследования . . . . .	38
<b>Глава 2. Развитие комбинированного оптико-акустического метода     для мониторинга процессов усталостного разрушения     конструкционных материалов</b> . . . . .	39

2.1	Разработка испытательно-мониторингового комплекса (ИМК) для контроля (оценки) состояния конструкционных материалов комбинированным оптико-акустическим методом в процессе нагружения . . . . .	39
2.1.1	Разработка принципиальной схемы ИМК . . . . .	39
2.1.2	Разработка алгоритма работы ИМК . . . . .	45
2.1.3	Аппаратная реализация ИМК . . . . .	46
2.1.4	Фиксация пьезоэлектрических элементов на поверхности образца . . . . .	49
2.1.5	Методика мониторинга состояния методом корреляции цифровых изображений . . . . .	50
2.1.6	Подбор параметров зондирующего акустического сигнала .	51
2.1.7	Расчет информативных параметров зондирующих акустических сигналов . . . . .	53
2.2	Тестирование разработанного испытательно-мониторингового комплекса на примере контроля состояния образцов алюминиевого сплава В96ц3Т12 . . . . .	55
2.2.1	Материал и методика тестирования . . . . .	56
2.2.2	Результаты тестирования . . . . .	57
2.2.3	Обсуждение результатов тестирования . . . . .	62
2.2.4	Заключение по разделу 2.2 . . . . .	64
2.3	Заключение по главе 2 . . . . .	65
<b>Глава 3. Лабораторный исследовательско-диагностический комплекс (ЛИДК) на основе метода корреляции цифровых изображений для оценки усталостного разрушения металлических материалов . . . . .</b>		
3.1	Введение к Главе 3 . . . . .	67
3.2	Разработка методики управления процессом роста усталостной трещины на основе теоретических расчетов и экспериментальной верификацией с помощью растровой электронной микроскопии . . . . .	68

3.2.1	Теоретические основы проведения усталостных испытаний на основе методики испытания с применением циклов перегрузки-разгрузки . . . . .	68
3.2.2	Экспериментальное исследование и тестирование методики управления ростом трещины при приложении циклов перегрузки-разгрузки . . . . .	72
3.2.3	Результаты экспериментального исследования . . . . .	73
3.2.4	Обсуждение результатов и постановка задачи на разработку лабораторного исследовательско-диагностического комплекса (ЛИДК) для исследования процессов роста усталостных трещин . . .	79
3.3	Разработка лабораторного исследовательско-диагностического комплекса (ЛИДК) для мониторинга процессов усталостного разрушения и оценки роста усталостных трещин на основе метода корреляции цифровых изображений . . . . .	82
3.3.1	Задачи разрабатываемого комплекса . . . . .	82
3.3.2	Разработка принципиальной схемы ЛИДК . . . . .	83
3.3.3	Разработка алгоритма работы ЛИДК . . . . .	88
3.3.4	Аппаратная реализация ЛИДК . . . . .	90
3.3.5	Алгоритм распознавания трещины и определение ее вершины . . . . .	93
3.3.6	Параметры механики разрушения, получаемые при помощи ЛИДК . . . . .	94
3.3.7	Обсуждение точности рассчитываемых информативных параметров . . . . .	96
3.4	Тестирование методики оценки параметров механики разрушения для усталостной трещины в плоском образце из алюминиевого сплава Д16Т . . . . .	98
3.4.1	Материал и методика тестирования . . . . .	99
3.4.2	Результаты тестирования и их обсуждение . . . . .	100
3.4.3	Заключение по разделу 3.4 . . . . .	102
3.5	Заключение по Главе 3 . . . . .	104

<b>Глава 4. Прикладные задачи по оценке усталостного разрушения конструкционных материалов</b> . . . . .	<b>105</b>
4.1 Разработка методики комбинированного оптико-акустического мониторинга поврежденности стеклопластиковых композитов (GFRP) при циклическом нагружении . . . . .	105
4.1.1 Введение к разделу 4.1 . . . . .	105
4.1.2 Описание методики для мониторинга поврежденности стеклопластиковых композитов . . . . .	106
4.1.3 Тестирование разработанной методики . . . . .	109
4.1.4 Интерпретация результатов тестирования с позиции механики разрушения . . . . .	117
4.1.5 Заключение по разделу 4.1 . . . . .	119
4.2 Разработка метода мониторинга состояния трехслойных углепластиковых композиционных материалов с сотовым заполнением при циклическом нагружении с использованием волн Лэмба . . . . .	121
4.2.1 Введение к разделу 4.2 . . . . .	121
4.2.2 Методика проведения испытаний и оценки поврежденности	121
4.2.3 Результаты тестирования методики УЗ-мониторинга . . . . .	123
4.2.4 Обсуждение полученных результатов . . . . .	125
4.2.5 Заключение по разделу 4.2 . . . . .	126
4.3 Оптический метод контроля состояния наполненных композитов на основе СВМПЭ по упругому восстановлению при контактном циклическом нагружении . . . . .	127
4.3.1 Введение к разделу 4.3 . . . . .	127
4.3.2 Результаты испытаний на контактное циклическое воздействие в полимерных композитах на основе СВМПЭ .	128
4.3.3 Заключение по разделу 4.3 . . . . .	133
4.4 Разработка метода количественной оценки усталостного разрушения в сварных соединениях сплава ВТ-23 в исходном состоянии и после обработки . . . . .	135
4.4.1 Описание методики проведения усталостных испытаний . .	136
4.4.2 Результаты испытаний и обработки изображений . . . . .	137

	Стр.
4.4.3 Результаты фрактографического анализа на РЭМ . . . . .	140
4.4.4 Заключение по разделу 4.4 . . . . .	142
4.5 Заключение по Главе 4 . . . . .	144
<b>Заключение . . . . .</b>	<b>146</b>
<b>Список сокращений и условных обозначений . . . . .</b>	<b>149</b>
<b>Список литературы . . . . .</b>	<b>151</b>
<b>Приложение А. Акт внедрения ПАО «Компания Сухой»«ОКБ Сухого» .</b>	<b>165</b>
<b>Приложение Б. Акт внедрения в учебный процесс НИ ТПУ . . . . .</b>	<b>166</b>

## Введение

**Актуальность работы.** В свете развития новых производственных технологий, создания новых материалов, методов и оборудования для изготовления машин и конструкций, а также повышения требований к их безопасной эксплуатации, вопросы надежного и эффективного контроля состояния изделий в машиностроении становятся всё более актуальными. Современные концепции проектирования конструкций основаны на подходе, называемом в западной литературе «damage tolerant design» («проектирование с учётом допустимых повреждений»), что подразумевает сохранение их работоспособности при наличии дефектов размерами меньше критических. При этом расчетный критический размер дефекта должен быть больше, чем минимально обнаруживаемый методами неразрушающего контроля. Такой подход требует проведения регулярного периодического контроля состояния элементов конструкции, а выбор интервала между проверками (осмотрами) является компромиссом между стоимостью обслуживания и безопасностью. Особую актуальность данные вопросы приобретают с позиции контроля дефектов, вызванных приложением циклических нагрузок (усталостным разрушением).

Традиционные способы выявления повреждений позволяют обнаруживать дефекты малых размеров, однако далеко не всегда обладают высокой производительностью, требуют существенных временных затрат и т. д. По этой причине актуальным становится вопрос разработки методов неразрушающего контроля, обеспечивающих высокий уровень достоверного обнаружения повреждений, высокую производительность, а также возможности автоматизации. Перспективным направлением исследований и разработок является создание систем встроенного контроля, способных проводить мониторинг поврежденности конструкции в процессе эксплуатации, тем самым существенно снижая издержки и повышая безопасность.

Значительные перспективы в области встроенного контроля изделий открывает использование ультразвуковых волн Лэмба. Одним из основных их преимуществ является низкий коэффициент затухания, что позволяет акустической волне распространяться на большие расстояния, обеспечивая возможность контроля деталей больших размеров и уменьшая количество необходимых преобразователей/датчиков. Данный подход позволяет обнаруживать повреждения, выявляемые по изменению параметров распространяющейся волны, проходящей

непосредственно через поврежденную область или вблизи нее. Недостатками акустического контроля волнами Лэмба является сильная дисперсия волн, генерация нескольких волновых мод, а также возможность контролировать только конструкции близкие по форме к пластинам и оболочкам. Существенный вклад в развитие данного метода внесли И.А. Викторов, В. Джерджутиу, П. Уилкоккс, В. Сташевский, Д. Балэжа, П. Коули и др.

В последние годы при проведении научных исследований большую популярность приобрел оптический метод корреляции цифровых изображений (Digital Image Correlation – DIC), позволяющий осуществлять мониторинг деформационного поведения материалов в процессе статических, а также циклических испытаний. К преимуществам данного метода следует отнести бесконтактность, наглядность визуализации результатов в виде полей смещений (деформаций), а также возможность точного измерения величин деформации на поверхности. К недостаткам относятся возможность характеристики процессов только со стороны наблюдаемой поверхности, повышенные требования к подготовке поверхности, освещенности и др. Основные результаты по разработке и применению метода корреляции цифровых изображений отражены в работах М. Саттона, Б. Пана, Ф. Хильда, Дж. Фонсека, Д. Дебрюйне, Ф. Перуа и др.

Комбинированное использование акустического и оптического методов исследований деформационного поведения в лабораторных условиях позволяют преодолеть недостатки каждого из них в отдельности и получить возможность многомасштабной характеристики процессов деформации и разрушения материала, а также способствует созданию систем мониторинга целостности конструкции (Structural Health Monitoring – SHM) на их основе. По этой причине актуальной научно-технической задачей является разработка подходов и методов к проведению мониторинга состояния материалов в процессе циклического нагружения с применением оптического (на основе метода корреляции цифровых изображений) и акустического (зондирование волнами Лэмба) методов, а также создание на их основе автоматизированных лабораторных и промышленных комплексов.

**Целью настоящей работы** является разработка и исследование функционирования лабораторных испытательных комплексов для мониторинга процессов накопления повреждений, роста трещин и разрушения металлических и армированных полимерных композиционных материалов с использованием оптического и акустического методов в процессе усталостных испытаний.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать принципиальную схему и алгоритм работы испытательно-мониторингового комплекса (ИМК) для комбинированного оптико-акустического контроля (на основе совмещения оптического метода корреляции цифровых изображений и акустического метода контроля волнами Лэмба) состояния конструкционных материалов *in situ* в процессе циклического нагружения и провести его тестирование.

2. Предложить информативные параметры и методику их расчета путем обработки регистрируемых акустических сигналов и оптических изображений для характеристики механического состояния нагруженных композиционных материалов и оценки степени их поврежденности.

3. Разработать принципиальную схему, алгоритм работы и провести тестирование автоматизированного лабораторного исследовательско-диагностического комплекса (ЛИДК) для оценки состояния нагруженных металлических материалов на основе метода корреляции цифровых изображений, включающий возможность реализации методик управления ростом усталостной трещины и расчета параметров данного процесса в терминах механики разрушения.

4. Провести исследование функционирования разработанных программных и аппаратных средств для мониторинга состояния металлических и армированных полимерных материалов в процессе циклического нагружения оптическим и акустическим методами при решении прикладных научных задач.

**Научную новизну** работы определяют:

1. Разработанный подход к проведению комбинированного мониторинга состояния образцов конструкционных материалов в процессе циклического нагружения при помощи оптического (на основе метода корреляции цифровых изображений) и акустического (волн Лэмба ультразвуковой частоты) методов с расчетом информативных параметров акустических сигналов и оптических изображений, в основе которого лежит совместный анализ данных и выделение на их основе характерных стадий процессов усталостного разрушения (пп. 1, 6 паспорта специальности 05.13.11).

2. Предложенный алгоритм работы системы контроля за процессом роста усталостной трещины в рамках разработанного лабораторного исследовательско-диагностического комплекса. Отличительной особенностью предлагаемого подхода является использование разработанного алгоритма распознавания для

перемещения камеры в область, соответствующую вершине распространяющейся трещины (пп. 6 паспорта специальности 05.13.11).

3. Разработанная методика оценки параметров роста усталостной трещины в терминах механики разрушения, получаемая на основе данных, регистрируемых методом корреляции цифровых изображений (пп. 1 паспорта специальности 05.13.11).

4. Совокупность полученных экспериментальных результатов по тестированию разработанных алгоритмов, методов и лабораторных комплексов при решении прикладных задач мониторинга механического состояния и анализа процессов роста усталостной трещины для армированных полимерных композиционных материалов, металлических сплавов и их сварных соединений (пп. 1, 6 паспорта специальности 05.13.11).

**Теоретическую и практическую значимость работы составляют:**

1. Разработанный испытательно-мониторинговый комплекс и программное обеспечение для оценки текущего состояния образцов конструкционных материалов в процессе циклического нагружения, которые активно применяются при проведении фундаментальных и прикладных исследований в ИФПМ СО РАН и НИ ТПУ (подтверждено Актом использования результатов в НИ ТПУ).

2. Набор предложенных информативных параметров и методы их расчета для оценки механического состояния и степени поврежденности конструкционных материалов с возможностью локации повреждений в крупногабаритных изделиях при проведении комбинированного акустического и оптического мониторинга. На «Программу для локации повреждений в композиционных материалах с помощью сети распределенных датчиков с использованием волн Лэмба» получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2018616605.

3. Разработанный автоматизированный лабораторный исследовательско-диагностический комплекс и программное обеспечение, которые активно применяются при проведении фундаментальных и прикладных исследований в ИФПМ СО РАН и НИ ТПУ, для изучения процессов роста усталостных трещин в образцах металлических материалов.

4. Алгоритмическое и программное обеспечение, включая методики расчета параметров механики разрушения на основе данных, получаемых методом

корреляции цифровых изображений. На «Программу определения положения трещины и координат ее вершины по оптическому потоку и пространственной информации» получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2017611355.

**Методология и методы исследования.** В качестве основных методов исследования в работе использованы методы цифровой обработки и анализа сигналов и изображений, математической статистики, теории оптимизации, физического моделирования, методы экспериментального исследования при испытаниях на циклическую долговечность.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается стабильной воспроизводимостью экспериментальных результатов на статистически значимом количестве испытаний, систематическим характером экспериментальных исследований и использованием сертифицированного испытательного и измерительного оборудования, согласием полученных экспериментальных результатов с данными независимых научных исследований, опубликованным в рецензируемых международных журналах.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Функциональная схема и алгоритм работы испытательно-мониторингового комплекса, а также методика контроля состояния конструкционных материалов в процессе циклического нагружения, основанная на расчете информативных параметров регистрируемых акустических сигналов и оптических изображений, позволяют через выявление характерных стадий усталостного разрушения (в величинах наработки) получать оценку степени поврежденности материала.

2. Функциональная схема и алгоритм работы автоматизированного лабораторного исследовательско-диагностического комплекса, набор информативных параметров (скорость роста трещины, максимальная величина деформации у вершины, уровень открытия/закрытия трещины), а также методика их расчета на основе данных, получаемых методом корреляции цифровых изображений, позволяют количественно характеризовать процесс распространения усталостной трещины в металлических материалах в терминах механики разрушения в процессе однородного и неоднородного циклического нагружения.

3. Варианты реализации лабораторных комплексов, основанных на оптическом и акустическом методах (как совместно, так и отдельно) для проведения оценки состояния металлических и полимерных композиционных материалов в

процессе циклического нагружения путем выделения характерных стадий изменения информативных параметров, а также расчета параметров роста трещины в терминах механики разрушения.

**Апробация работы.** Результаты работы были представлены на следующих конференциях и семинарах: XX научно-технической конференции молодых учёных и специалистов (г. Королёв, 2014); 11th European Conference on Non-Destructive Testing (Prague, Czech Republic, 2014); XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (г. Казань, 2015); XXI Международная научная конференция студентов и молодых учёных «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2015); VI Всероссийская конференция молодых ученых «Материаловедение, технологии и экология в третьем тысячелетии» (г. Томск, 2016); X международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, 2016); Proceedings of First Structural Integrity Conference and Exhibition (Bangalore, India, 2016); Международная конференция с элементами научной школы для молодежи «Современные технологии и материалы новых поколений» (г. Томск, 2017); Russia-Japan Conference: «Advanced Materials: Synthesis, Processing and Properties of Nanostructures» (Sendai, Japan, 2017); Юбилейная международная научно-техническая конференция, посвящённая 75-летию со дня основания СибНИА (г. Новосибирск, 2016); Международная конференция «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» (г. Томск, 2017); 2nd International Conference on Structural Integrity (Madeira, Portugal, 2017); VII Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (г. Москва, 2017).

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 23 печатных изданиях, 4 из которых опубликованы в журналах из перечня ВАК, 11 — в журналах, индексируемых WoS и Scopus, 8 — в тезисах докладов.

**Связь работы с научными программами и темами.** Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН) и Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования Национальный исследовательский Томский политехнический университет (НИ ТПУ) в соответствии с планами государственных и отраслевых научных программ: ВИУ-НОИЦ НМНТ ТПУ-223/2018 «Разработка научных основ создания композиционных

материалов на керамической и полимерной основах» (2018-2020 гг.); ФЦП по теме «Разработка с использованием многоуровневых компьютерных моделей иерархически армированных гетеромодульных экструдированных твердосмазочных нанокompозитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена для применения в узлах трения и футеровки деталей машин и механизмов, работающих в условиях Крайнего Севера»; проект РФФИ №13-07-00009 «Развитие быстродействующих и помехоустойчивых алгоритмов обработки и анализа оптических и акустических сигналов для комбинированного метода контроля состояния нагруженных материалов» (2013-2015 гг.); проект РФФИ №15-08-05818 «Многоуровневое описание малоциклового усталости поликристаллических и наноструктурных сред с учетом ротационных мод деформации» (2015-2017 гг.); проект РФФИ №16-38-00526 «Разработка научных основ оптического метода оценки деформации нагруженных материалов» (2016-2017 гг.); НИР по х/д №009/14 с ПАО «Компания Сухой» «ОКБ Сухого» по теме: «Исследование возможности применения встроенных методов неразрушающего контроля для металлических и композиционных материалов» (2014-2016 гг.).

**Внедрение работы.** Созданные аппаратно-программные комплексы и разработанные методы мониторинга применяются в ИФМП СО РАН и НИ ТПУ при проведении циклических и статических испытаний материалов в рамках фундаментальных и прикладных НИР. Автор принимал участие в работах по договору НИР с ПАО «Компания Сухой» «ОКБ Сухого» по теме «Исследование возможности применения встроенных методов неразрушающего контроля для металлических и полимерных композиционных материалов». Разработанные алгоритмы и подход к проведению мониторинга состояния на основе акустического метода контроля волнами Лэмба используются в ПАО «Компания Сухой» «ОКБ Сухого». Результаты диссертации используются в учебном процессе в Инженерной школе новых производственных технологий Национального Исследовательского Томского политехнического университета при подготовке образовательных дисциплин «Мониторинг состояния и контроль надежности материалов и изделий» и «Диагностика материалов» для магистров по направлению 22.04.01 — Материаловедение и технологии материалов.

**Личный вклад.** Совместно с научным руководителем выполнена постановка задач диссертационного исследования, анализ и обсуждение результатов теоретических и практических исследований. В соавторстве спроектирован и

собран испытательно-мониторинговый комплекс для комбинированного мониторинга состояния образцов конструкционных материалов комбинированным оптико-акустическим методом. Проведено его тестирование в ходе усталостных испытаний образцов алюминиевых сплавов со сварными соединениями, а также угле- и стеклопластиковых композиционных материалов.

С использованием разработанного комплекса проведены экспериментальные исследования процессов роста усталостных трещин при неоднородном циклическом нагружении с приложением периодических циклов перегрузки-разгрузки. На основании полученных результатов разработан метод оценки параметров роста усталостной трещины на основе данных измерений, получаемых методом корреляции цифровых изображений.

В соавторстве спроектирован лабораторный стенд для проведения усталостных испытаний с использованием метода корреляции цифровых изображений с возможностью слежения за вершиной распространяющейся трещины и расчетом информативных параметров в терминах механики разрушения. Проведено экспериментальное тестирование стенда при испытании алюминиевых образцов в условиях приложения единичных циклов перегрузки.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и двух приложений. Полный объём диссертации составляет 166 страниц с 62 рисунками и 6 таблицами. Список литературы содержит 123 наименования.

**В первой главе** диссертации представлен аналитический обзор литературных данных по теме диссертации, который состоит из трех разделов. В первом разделе рассматриваются общие аспекты усталостного разрушения материалов. Анализируются работы по исследованию процессов роста усталостной трещины, формированию пластических зон в окрестности вершины трещины, влиянию неоднородного нагружения на рост трещины, а также описываются особенности разрушения композиционных материалов, армированных непрерывными волокнами. Второй раздел посвящен подходам к проведению встроенного мониторинга состояния (SHM) и применению волн Лэмба для оценки степени поврежденности материала. Третий раздел содержит общие сведения о методе корреляции цифровых изображений и анализ его применения для расчета полей деформаций и параметров механики разрушения в процессе роста усталостной трещины. По результатам проведенного анализа в конце главы формулируются задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** приводится описание процесса разработки испытательно-мониторингового комплекса (ИМК) на основе комбинированного использования двух методов: оптического (метод корреляции цифровых изображений) и акустического (волны Лэмба). Для разработанного ИМК представлены принципиальная схема, алгоритм работы, проведен выбор аппаратных средств для его реализации, методики получения, обработки и анализа оптических изображений и акустических сигналов. Далее приводятся результаты тестирования ИМК на примере образцов высокопрочного алюминиевого сплава авиационного назначения со сварными соединениями. Полученные результаты тестирования комплекса с привлечением оптико-акустического мониторинга состояния образцов анализируются с привлечением стадийного подхода к рассмотрению процессов разрушения и трактуются с точки зрения механики усталостного разрушения.

**Третья глава** посвящена разработке автоматизированного лабораторного исследовательско-диагностического комплекса, использующего метод корреляции цифровых изображений для оценки параметров роста трещины (в терминах механики разрушения), а также оценки состояния материала на основе анализа рассчитанных параметров. Рассмотрены методики расчета информативных параметров (в терминах механики разрушения) и проведено исследование функционирования комплекса на примере компактного образца алюминиевого сплава Д16АТ с трещиной при усталостном испытании с введением единичных циклов перегрузки. Кроме того, отдельное внимание уделяется РЭМ-фрактографическому анализу и тестированию подходов к управлению процессом роста трещины путем приложения периодических циклов перегрузки-разгрузки.

**В четвертой главе** приведены примеры решения прикладных задач по мониторингу состояния различных материалов с применением разработанных в рамках диссертационной работы методов и комплексов. При этом решались задачи по проведению мониторинга состояния композиционных материалов — стеклопластиковых слоистых однонаправленно армированных композитов в рамках трехстороннего научно-технического сотрудничества между ИФМП СО РАН (Россия), а также компаниями LM (Дания) и ViSS (Индия). Далее проводился анализ трехслойных сэндвич панелей из углепластика с заполнением алюминиевыми сотами в рамках НИР с ПАО «Компания Сухой» «ОКБ Сухого».

В завершении демонстрируется применимость разработанных методик для анализа процессов усталостного разрушения образцов высокопрочного титанового сплава ВТ-23 с неразъемными соединениями, выполненными лазерной сваркой.

**В заключении** приводятся основные выводы по результатам диссертации.

В диссертации принята двойная нумерация рисунков и таблиц, где первая цифра указывает номер главы, а вторая – порядковый номер рисунка или таблицы внутри данной главы.

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю благодарность и признательность сотрудникам ИФПМ СО РАН к.т.н. М.В. Буркову, к.т.н. А.В. Бякову и к.т.н. П. С. Любутину за помощь в проведении исследований по разработке ИМК (Глава 2). В.О. Чемезову и П. С. Любутину за помощь в разработке алгоритма детектирования усталостной трещины для ЛИДК (Глава 3). Доктору Сундеру Рамасуббу за плодотворное обсуждение результатов исследований по распространению усталостных трещин; д.т.н. С.В. Панину за научное руководство и обсуждение результатов.

## Глава 1. Обзор литературы

### 1.1 Общие понятия усталостного разрушения материалов

#### 1.1.1 Предел выносливости и кинетическая диаграмма усталостного разрушения

Процесс разрушения материала от зародившегося дефекта под воздействием циклически изменяющихся напряжений называют усталостью материалов. На протяжении многих лет подавляющее большинство аварий в области авиационного (элементы конструкций самолетов), строительства (здания, мосты) и машиностроения (роторы, валы, котлы) происходило в связи с деградацией структуры и свойств конструкционных материалов, вызванных усталостью. При этом в условиях повторяющихся нагрузок разрушение может происходить при напряжениях, существенно меньших, чем предел текучести/прочности. Разрушение может быть вызвано как воздействием отдельных внешних факторов, так и их совокупностью: механическое нагружение, агрессивная среда (коррозионная усталость) и повышенные температуры (усталость при ползучести) и пр.

Первые системные исследования для понимания процесса усталостного разрушения были проведены А. Вёллером [1] и Басквином [2], который выявил зависимость количества циклов до разрушения от амплитуды прикладываемого напряжения. Такая зависимость, представленная графически, называется кривой усталости или кривой Вёллера. Примеры кривых усталости для разных материалов представлены на рисунке 1.1. Изучая усталостные свойства различных материалов можно выделить три вида кривых: (а) в форме прямой линии, свойственная преимущественно композиционным материалам, таким как армированные непрерывными волокнами пластики; (б) кривую, характеризующую наличием предел выносливости (напряжение при котором образец никогда не разрушится) и (в) кривую, характеризующую усталостную прочность, которая определяется по достижению базы испытания в  $10^7$ – $10^8$  циклов).

Усталостное разрушение разных материалов происходит по-разному, однако, традиционно рассматривается процесс разрушения достаточно вязких металлических материалов, например, широко известного авиационного алюминиевого сплава Д16Т. Процесс разрушения при циклическом нагружении можно разделить на несколько следующих друг за другом стадий [4]: (1) циклическая пластическая деформация до зарождения трещины [5–8]; (2) зарождение одной

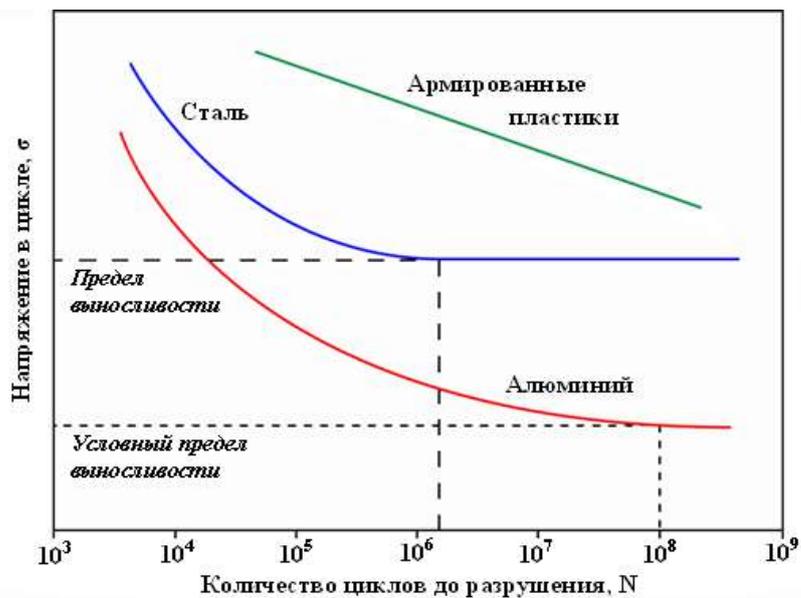


Рисунок 1.1 — Пример кривых усталости (кривая Веллера) для пластика, армированного волокнами, стали и алюминия. Рисунок адаптирован из [3]

или нескольких микротрещин [9; 10]; (3) рост и слияние микротрещин с формированием одной или нескольких макротрещин; (4) рост и распространение, как макро, так и микротрещин; (5) финальное разрушение (долом).

Современная концепция конструирования, в особенности ответственных деталей и конструкций, основывается на условии, что наличие повреждения даже достаточно больших размеров не должно приводить к моментальному (катастрофическому) разрушению изделия [11]. Такой подход дает возможность инженерам при помощи средств неразрушающего контроля обнаружить дефект и произвести ремонтные работы.

Для многих инженерных задач и приложений учет этапа зарождения трещины не является необходимым, поэтому при лабораторных испытаниях используется кинетическая диаграмма усталостного разрушения — КДУР (Рисунок 1.2).

Диаграммы такого рода иллюстрируют зависимость скорости роста трещины от размаха значений коэффициента интенсивности напряжений (КИН) или его максимального значения  $K_{max}$  [12]. Полные КДУР в логарифмических координатах  $\lg(dl/dN)$  от  $K_{max}$  являются S-образными кривыми, которые по оси  $x$  ограничиваются двумя вертикальными асимптотами — пороговым значением КИН  $K_{th}$  слева и критическим значением КИН  $K_{fc}$  справа; здесь  $K_{th}$  — это значение КИН, ниже которого трещина в данном материале не будет расти,

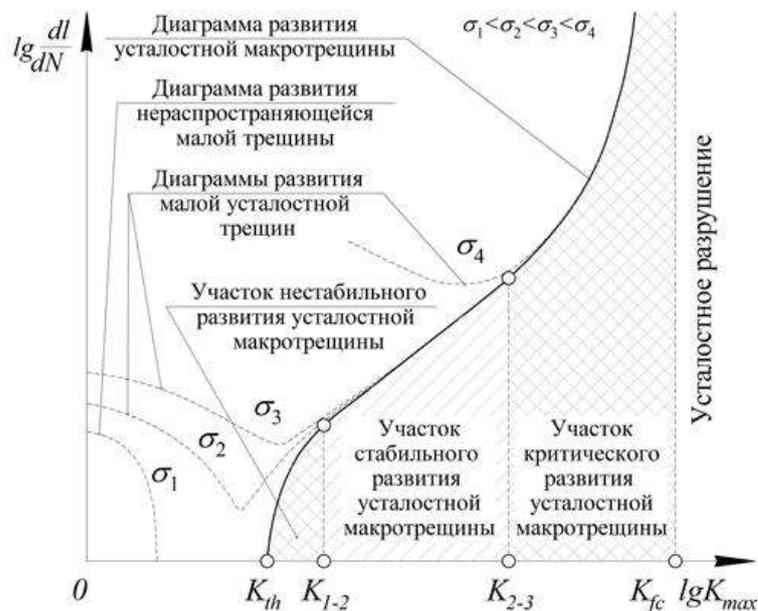


Рисунок 1.2 — Кинетическая диаграмма развития усталостного разрушения

а  $K_{fc}$  — критическое значение, выше которого развивается неустойчивое (катастрофическое) разрушение.

Полная КДУР состоит из трех участков: а) начального участка нестабильного роста усталостной трещины или его еще называют припороговый рост; б) затем идет линейный участок стабильного роста усталостной трещины, называемый участком Пэриса; в) на финальной стадии — участок критического роста трещины.

Наиболее значимой стадией роста трещины является линейный участок, как наиболее протяженный, и на котором возможен и необходим регулярный мониторинг растущей трещины методами неразрушающего контроля.

П. Перисом и Ф. Эрдоганом в 1960-х годах была предложена взаимосвязь скорости роста усталостной трещины с диапазоном величины интенсивности напряжений, выражаемый через коэффициент  $\Delta K$  [13].

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1.1)$$

где  $C$  и  $m$  — эмпирические константы материала и схемы нагружения, а  $\Delta K = K_{max} - K_{min}$

Данный подход долгое время был основным методом расчёта усталостной долговечности конструкции, пока не был обнаружен эффект закрытия трещины, впервые предложенный В. Элбером в 1970-х. В его работе [14] взамен традиционного диапазона  $\Delta K$  был введён эффективный диапазон изменения КИН  $\Delta K_{eff}$ , который учитывает тот факт, что усталостная трещина

остаётся закрытой ниже определённой величины прикладываемой нагрузки:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{eff})^m \quad (1.2)$$

где  $\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op}$ , а  $K_{op}$  — КИН, при котором происходит открытие трещины.

Для учёта эффекта закрытия и его влияния на процесс распространения усталостной трещины необходимо определить уровень закрытия, т.е. КИН или нагрузку, при которой края трещины смыкаются, а материал впереди вершины перестает реагировать на изменение прикладываемой нагрузки. Работы последних лет, использующих данную концепцию, в большей степени основаны на исследованиях Дж. Ньюмана, анализировавшего проблему закрытия трещины с использованием разработанных им моделей [15; 16].

### 1.1.2 Пластические зоны у вершины усталостной трещины

Нагружение образца с трещиной имеет свои особенности по сравнению с нагружением однородного материала без дефектов. В частности, наличие трещины вызывает концентрацию напряжений в её вершине, которая математически описывается при помощи КИН. Значение КИН полностью определяет поле напряжений в окрестности вершины трещины:

$$\sigma_{i,j} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} f_{i,j}(\theta) \quad (1.3)$$

Здесь  $K_I$  — коэффициент интенсивности напряжений при нормальном отрыве. Если задана или известна величина КИН, то можно считать, что поле напряжений в области трещины полностью определено. При определении напряжений только в окрестности вершины первый член ряда описывает их с достаточной точностью, однако при удалении от вершины необходимо учитывать и более высокие порядки.

Стоит отметить, что значение  $r$  — это расстояние от вершины трещины до точки, в которой определяются напряжения. Согласно продемонстрированным формулам линейной механики разрушения в вершине трещины (где  $r = 0$ ) напряжения обращаются в бесконечность (т.н. проблема сингулярности в вершине трещины), чего не происходит в реальном материале. Для реального материала напряжения достигают предела текучести  $\sigma_{ys}$  и развитие пластических деформаций ограничивает рост напряжений. Описанный эффект демонстрируется эпюрой на рисунке 1.3.

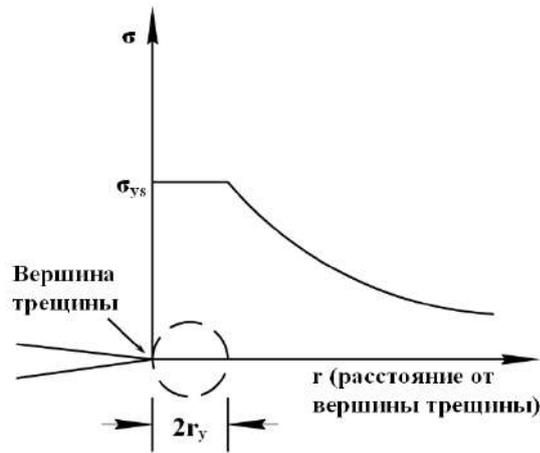


Рисунок 1.3 — Зона пластичности у вершины трещины.

Размер формируемой пластической зоны определяется величиной возникающего КИН, пределом текучести материала и видом напряженного состояния. Необходимо различать и учитывать два вида напряженного состояния: плоское напряженное (ПНС) и плоское деформированное (ПДС). Схема двух напряженных состояний изображена на рисунке 1.4. В тонком материале напряжение не может существенно изменяться по толщине, а поверхности находятся в свободном состоянии. В этом случае вне плоскости не возникает напряжений  $\sigma_z = 0$ , но возможны ненулевые деформации  $\varepsilon_z \neq 0$ . В случае плоской деформации, характерной для тел с большой толщиной, возникает эффект стесненности, тогда  $\varepsilon_z = 0$  и, как следствие, ненулевые напряжения вдоль оси  $z$  ( $\sigma_z \neq 0$ ). Отдельно стоит отметить, что на поверхности образцов большой толщины возникает состояние близкое к плоскому напряжению.

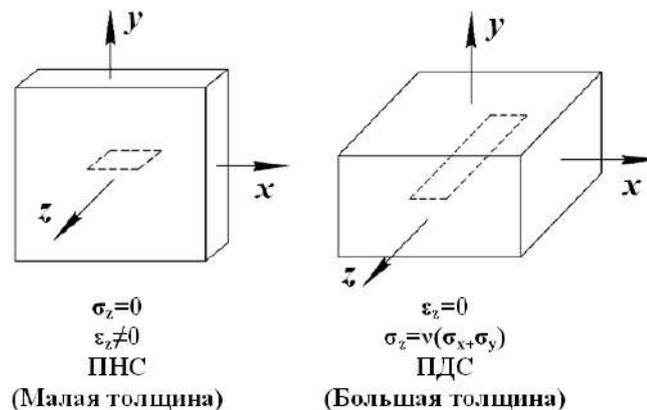


Рисунок 1.4 — Иллюстрация плоского напряженного и плоского деформированного состояния в материале. Первое характерно для тонких образцов, второй — для образцов большой толщины

Радиус пластической зоны у вершины трещины вычисляется согласно выражениям:

$$\begin{aligned} r_y &= \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K}{\sigma_{ys}} \right) \\ r_y &= \frac{1}{6\pi} \left( \frac{K}{\sigma_{ys}} \right) \end{aligned} \quad (1.4)$$

где  $\sigma_{ys}$  — предел текучести материала,  $K$  — коэффициент интенсивности напряжений.

Формирование пластической зоны происходит при монотонном возрастании нагрузки и, следовательно, растягивающих напряжений, поэтому описанная выше пластическая зона называется монотонной. При циклическом нагружении кроме полупериода возрастания нагрузки присутствует и полупериод уменьшения нагрузки, что приводит к формированию второй пластической зоны в материале, называемой циклической пластической зоной (рисунок 1.5). Ее появление вызвано тем, что при снижении нагрузки пластически деформированный материал начинает сжиматься окружающим его материалом, который деформирован упруго. Таким образом формируется зона сжимающих напряжений, которые превышают предел текучести при сжатии и формируют циклическую пластическую зону. Радиус такой зоны как минимум в 4 раза меньше, чем радиус монотонной пластической зоны, потому что при сжатии материала необходимо преодолеть двукратный предел текучести. Радиус пластической зоны у вершины трещины вычисляется согласно выражениям:

$$\begin{aligned} r_y &= \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K}{2\sigma_{ys}} \right) = \frac{1}{8\pi} \left( \frac{K}{\sigma_{ys}} \right) \\ r_y &= \frac{1}{6\pi} \left( \frac{K}{2\sigma_{ys}} \right) = \frac{1}{24\pi} \left( \frac{K}{\sigma_{ys}} \right) \end{aligned} \quad (1.5)$$

### 1.1.3 Влияние перегрузки на рост трещины

Поведение трещины при циклическом нагружении с переменной амплитудой существенно отличается от таковой для циклов с постоянной амплитудой, рассмотренных ранее. Простым примером влияние различных амплитуд нагружения является введение цикла перегрузки (рисунок 1.6). То есть, если циклическое нагружение ведется с постоянным уровнем КИН (или  $\sigma$ , или  $P$ ), то такой уровень нагрузки будет считаться базовым. Цикл перегрузки превышает

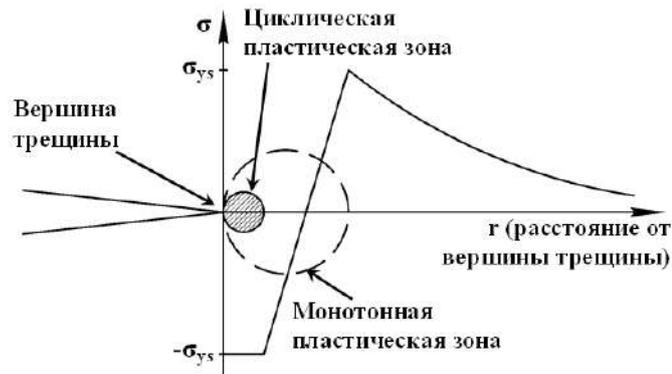


Рисунок 1.5 — Иллюстрация пластических зон у вершины трещины:  
циклическая и монотонная

базовый уровень нагрузки и чем больше это превышение, тем выше последующий эффект от перегрузки.

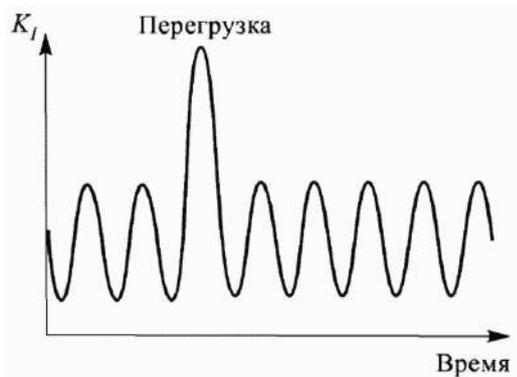
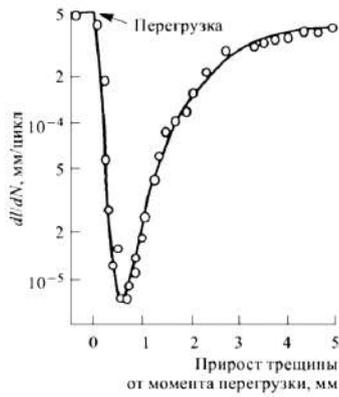


Рисунок 1.6 — Единичный цикл перегрузки выше базового уровня [17].

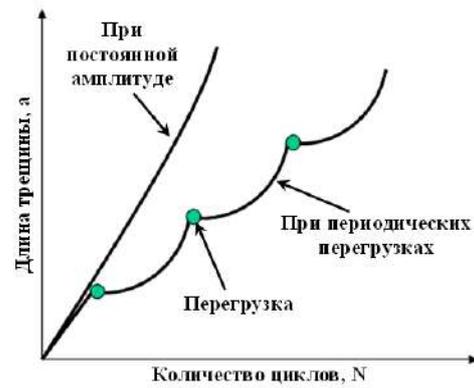
Введение в циклическое нагружение цикла перегрузки приводит к снижению скорости распространения трещины, однако, это влияние не перманентно и скорость затем восстанавливает свою первоначальную величину после прорастания трещины через монотонную пластическую зону, вызванную перегрузкой (рисунок 1.7).

Один из вариантов описания процесса торможения трещины при приложении единичного цикла перегрузки основан на модели О. Уиллера [19]. Данная модель основана на сопоставлении размеров пластической зоны  $r_{OvL}$ , сформированной циклом перегрузки, и монотонной пластической зоны при базовом уровне нагружения  $r_{base}$ . Влияние перегрузки происходит до тех пор, пока пластическая зона  $r_{base}$  не достигнет границы  $r_{OvL}$ . Коэффициент торможения в этом случае выражается в виде:

$$\Phi_R = \left( \frac{\Delta l + r_{base}}{r_{OvL}} \right)^\gamma \quad (1.6)$$



а) [17]



б) [18]

Рисунок 1.7 — Влияние перегрузки на скорость распространения усталостной трещины. После прорастания трещины на некоторую длину, влияние перегрузки снижается и значение скорости восстанавливается до первоначального.

где  $\gamma$  — эмпирический показатель степени.

Тогда замедление скорости роста трещины может быть выражено следующим образом:

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{ovL} = \Phi_R \left(\frac{da}{dN}\right)_{base} \quad (1.7)$$

где  $\left(\frac{da}{dN}\right)_{ovL}$  — скорость роста трещины после перегрузки,  $\left(\frac{da}{dN}\right)_{base}$  — скорость роста трещины до перегрузки (исходная скорость роста).

#### 1.1.4 Усталость композиционных материалов

Композиционные материалы (КМ) имеют существенные отличия от металлических, основным из которых является наличие в композитах двух отдельных компонентов: матрицы и армирующего наполнителя. При проектировании КМ армирующий компонент обычно выбирается таким образом, чтобы получить высокие прочность и жесткость, а условия выбора матрицы включают: (1) способность передавать/перераспределять нагрузку на микроуровне, чтобы она синхронно воспринималась армирующими элементами, (2) стойкость к воздействию внешней среды и (3) технологичность производства. Таким образом, матрица и наполнитель могут быть выбраны из широкого спектра металлических, полимерных, органических или керамических материалов. При нагружении волокна в большей степени определяют статическую прочность материала, а матрица — усталостную. В данной главе под КМ будут пониматься

слоистые материалы с матрицей на полимерной основе (эпоксидная, полиэстеровая) и с армированием непрерывными волокнами.

Подобная сложная внутренняя структура КМ влечет за собой и особенности процессов, как статического, так и усталостного разрушения. К возможным событиям разрушения относят следующие: неупругую деформацию (пластическое течение, появление сетки волосовидных трещин, вязкоупругое поведение), микрорастрескивание (волокна или матрицы), потеря адгезии на границе волокно-матрицы, отслоение отдельных слоев, а также всевозможные их комбинации [20]. Циклическое нагружение (усталость материала) ведет к формированию подобных дефектов в материале, снижая тем самым его предел прочности и жесткость. Если для многих однородных металлических материалов характерен этап до зарождения трещины, за которым следует стадия роста одной магистральной трещины, то для КМ подобное поведение не наблюдается. При этом отсутствует сколько-нибудь корректная аналогия с растущей в металле трещиной, так как КМ сильно неоднородны и необходимо принимать во внимание все процессы разрушения, описанные выше.

По этой причине в механике разрушения композитов используется понятие «накопление повреждений». Тогда физическое или механическое поведение материала при усталостном разрушении ассоциируется с (а) появлением «событий» разрушения (дефектов/повреждений) и (б) их распространением в основном материале на микроуровне (однако, например, расслоения могут достигать и макромасштаба размером до нескольких миллиметров) — в этом основное отличие поведения композитов от металлов при циклическом нагружении.

В общем случае процессы формирования повреждений в композиционных материалах могут быть проиллюстрированы в виде схемы на рисунке 1.8, которая демонстрирует какие механизмы разрушения материала играют доминирующую роль на разных стадиях наработки.

В процессе деградации свойств материала под действием циклических нагрузок выделяется 5 основных стадий формирования и развития различных дефектов:

1. появление первоначальных (микро) трещин в матрице и разрывы волокон по всему объему материала;
2. слияние и пересечение первичных трещин, появление вторичных трещин, потеря адгезии на границе волокно-матрица;
3. появление расслоений;

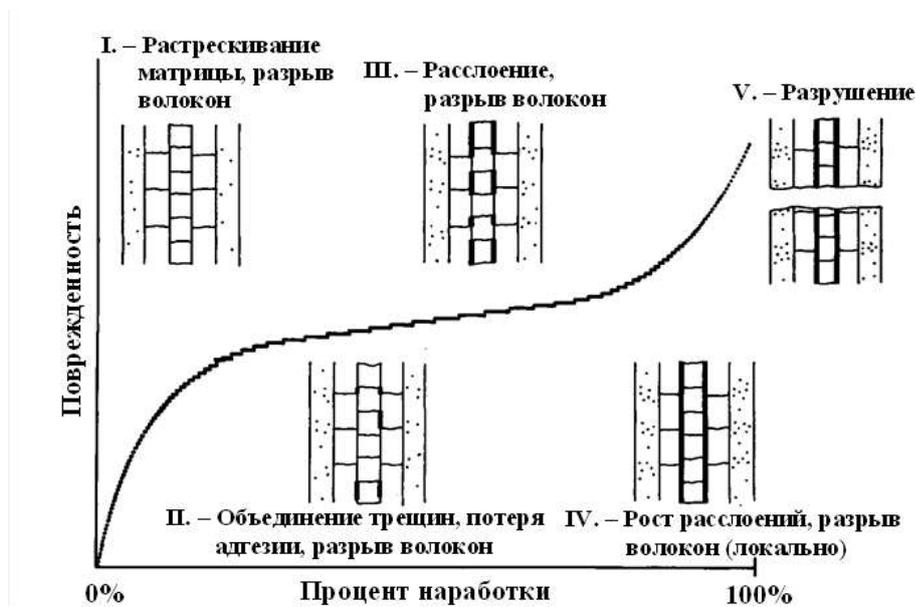


Рисунок 1.8 — Формирование и развитие повреждений в слоистых композиционных материалах на разных стадиях наработки [20].

4. рост расслоений и локализованный разрыв волокон;
5. разрушение.

Формирование и рост таких повреждений, в особенности, разрыв волокон ведет к снижению жесткости материала (снижению модуля упругости) и уменьшению его предела прочности, что требует особого контроля для предотвращения внезапного разрушения конструкции.

## 1.2 Применение волн Лэмба для оценки деградации состояния (поврежденности) композиционных материалов при циклическом нагружении

### 1.2.1 Понятие о встроенном контроле состояния

Встроенный контроль состояния конструкций, который в англоязычной литературе именуется как Structural Health Monitoring (SHM), ставит перед собой задачу получения полной оценки механического состояния исследуемой конструкции и любой ее отдельно взятой части в любой момент времени в течение всего срока службы. При этом состояние конструкции (уровень поврежденности элементов) должно оставаться в рамках, заложенных при проектировании. Необходимо учитывать процессы деградации свойств материала в процессе эксплуатации под воздействием, как возможных случайных событий, так и

факторов окружающей среды. Благодаря тому, что наблюдения производятся регулярно в течение длительного времени, то возможно создание информационной базы данных об истории эксплуатации конструкции, что в дальнейшем позволяет предсказывать развитие повреждений, время выхода из строя и многие другие параметры, а также предотвращать возможные катастрофические разрушения.

Если принимать во внимание только функцию контроля механического состояния, то SHM можно считать усовершенствованной встроенной системой неразрушающего контроля, которая подразумевает интеграцию в конструкцию сенсоров, линий передачи данных, оборудования для сбора показаний датчиков и проведения необходимых расчётов. Столь масштабное внедрение подразумевает пересмотр проектирования деталей и конструкций, полный контроль над деталью как таковой и над всей конструкцией в целом. Схематическое представление системы встроенного контроля представлено на рисунке 1.9.

Несколько сенсоров одинакового типа образуют сеть взаимосвязанных датчиков, которые позволяют получать обобщённые данные о наблюдаемом физическом процессе для последующего анализа. Сигнал, приходящий от встроенной системы мониторинга, наряду с записанными ранее показаниями датчиков, используется контроллером для проведения диагностики конструкции. Данная информация на основе заложенных в работу системы моделей и алгоритмов интерпретируется и позволяет прогнозировать остаточный ресурс элементов конструкции, а также своевременно назначать технические работы по продлению срока службы, либо ремонтные работы. Аналогичные системы мониторинга можно установить и на других конструкциях того же типа, что, в совокупности приводит к построению «супер-системы», позволяющей контролировать целые группы разнообразных объектов (сеть электростанций, парка самолётов, кораблей и т. п.).

### **1.2.2 Актуальность использования концепции SHM**

Необходимость получения информации о состоянии конструкций, находящихся в эксплуатации, в реальном времени является очень важной информацией, как для производителей, так и для конечных потребителей и бригад технического обслуживания. Преимущества, которые можно получить внедрением методик SHM:

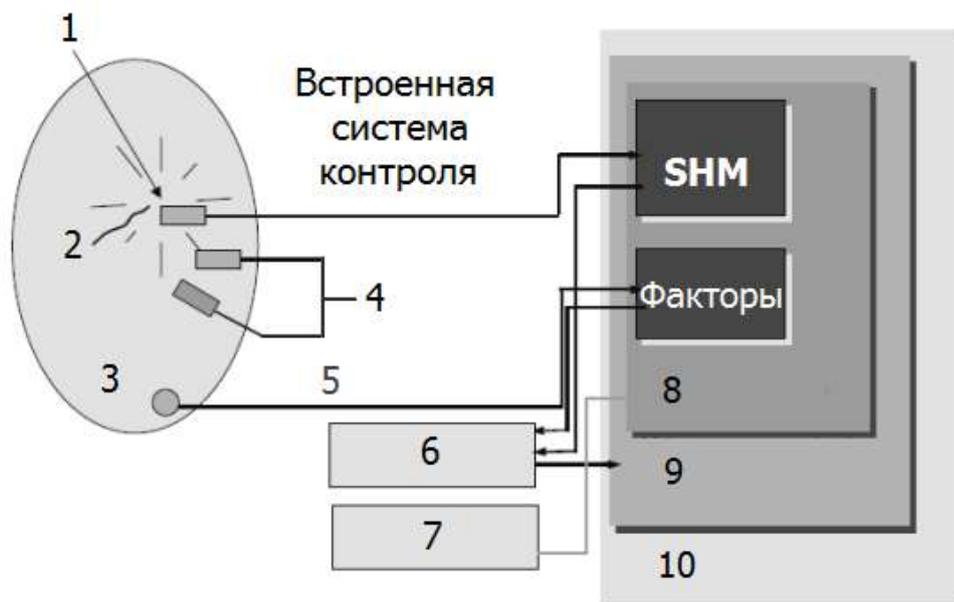


Рисунок 1.9 — Принцип построения и функционирования системы SHM:

1. Некоторый физический процесс в материале, вызванный появлением повреждения; 2. Повреждение; 3. Объект контроля; 4. Сеть датчиков для измерения параметров физического процесса, вызванного появлением повреждения; 5. Регистрация условий внешнего воздействия (условия окружающей среды) при проведении контроля; 6. Блок записи данных; 7. Модель повреждения и модель поведения объекта с таким повреждением;
8. Сбор данных об истории эксплуатации; 9. Контроль целостности конструкции; 10. Объединение группы аналогичных систем контроля – создание «супер-системы» [21].

1. Возможность оптимального использования конструкции, минимизация времени простоя во время плановых технических осмотров и значительное снижение риска критических отказов.

2. Возможность проектировщикам и производителям со значительно большей эффективностью определять слабые элементы конструкции и модернизировать её.

3. Радикально изменяет подход к организации процесса технического обслуживания, позволяя сократить временные и денежные затраты на процедуры регулярных технических осмотров, сократить число персонала, вовлечённого в сферу технического обслуживания, и снизить влияние человеческого фактора, что увеличит безопасность и надёжность.

Такие изменения в философии проведения встроенного контроля рассматривались в работах для военной промышленности [22], для гражданской авиации [23] и строительства. В работе [24] проводились оценки экономии временных ресурсов на проведение планового контроля военных самолётов. Было показано, что потенциально время работ после внедрения систем SHM можно сократить примерно на 40%. Совокупные итоговые данные по результатам анализа представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 — Оценка экономии времени на процедуре контроля при внедрении методов SHM для современных истребителей [24]

<b>Тип контроля</b>	<b>Текущее время контроля (в % от общего)</b>	<b>Потенциал при использовании встроенного контроля</b>	<b>Сэкономленное время (в % от общего)</b>
Контроль на парковке между вылетами	16	0,4	6,5
Плановый контроль	31	0,45	14,0
Внеплановый контроль	16	0,10	1,5
Контроль согласно инструкции по эксплуатации	37	0,60	22,0
<b>Итого:</b>	<b>100</b>		<b>44</b>

Другим фактором обуславливающим актуальность работ по разработке и созданию систем встроенного контроля является резкое увеличение применения композитов в авиастроении. Новые самолеты крупнейших производителей Boeing и Airbus спроектированы с широким применением композитов во всех силовых элементах (крыльев, фюзеляжа, оперения и др.), а их эксплуатация выявила различные повреждения и дефекты, поэтому производителями (в том

числе и российскими, например, МС-21 компании Иркут, имеющий значительную долю углепластиков в конструкции) были начаты работы по поиску новых концепций неразрушающего контроля, а также и встроенного контроля.

Наиболее проблемными повреждениями композиционных материалов являются расслоения, которые существенно снижают остаточную прочность на сжатие, однако в процессе эксплуатации расслоения начинают появляться вследствие воздействия проектных нагрузок на больших временах налета, поэтому для регулярных зон конструкции (лонжероны, стрингеры и др.) они не являются существенной проблемой в течение долгого времени. Совсем другая ситуация складывается для различных обтекателей и силовых обшивок, которые постоянно находятся под воздействием окружающей среды и подвержены ударным воздействиям. При этом удары, начиная с определенных энергий, будут приводить к появлению повреждений, которые визуально практически незаметны (*Barely visible impact damage — BVID*) и представляют собой комбинированные дефекты: расслоения с разрывом волокон и растрескиванием матрицы. Сами по себе такие дефекты (после низкоэнергетических ударов) не представляют опасности, так как запас прочности конструкции достаточно большой и остаточной статической прочности более чем достаточно. Однако вследствие воздействия эксплуатационных нагрузок такие расслоения могут вырасти, постепенно начиная угрожать безопасности полета. Опыт работы с новыми самолетами корпораций Boeing и Airbus показал, что ударных повреждений на элементах обшивки возникает огромное количество. Статистика позволяет локализовать области с максимальной вероятностью их появления, однако в любых других областях вероятность обнаружения расслоения является ненулевой.

Существуют процедуры планового неразрушающего контроля, которые в случае с композиционными обшивками существенно усложнятся из-за огромной площади последних. В такой ситуации наличие работоспособной и достаточно легкой системы встроенного контроля позволит сигнализировать о появлении повреждения (а в случае регистрации незначительных дефектов контролировать их до достижения минимально допустимого размера) для проведения своевременного ремонта.

### 1.2.3 Современные тенденции в разработки систем оценки состояния

Основные отрасли промышленности, заинтересованные в развитии технологий SHM являются: (1) авиастроение, которое предъявляет очень строгие и высокие требования к таким системам, однако получают существенные преимущества в случае их реализации; (2) нефтегазовая отрасль при строительстве новых и эксплуатации старых магистральных трубопроводов, а также для мониторинга хранилищ-резервуаров, где важен контроль целостности и дефектности; (3) гражданское строительство, например, мостов и иных сооружений.

Концепция основана на использовании встроенной регистрации и анализе конструкционных и физических характеристик для обнаружения изменений, которые могут свидетельствовать о повреждении и деградации материала [25–28].

При длительном контроле состояния данные о конструкции регистрируются с определенным периодом, позволяя анализировать состояние конструкции с точки зрения старения и накопления повреждений в процессе воздействия эксплуатационных факторов [29; 30]. SHM системы могут служить в качестве регистраторов одиночных событий: зарождение и распространение трещин вследствие воздействия повышенных нагрузок, образование повреждений вследствие ударов и др. Возможны комбинированные подходы, при которых системы могут работать как в пассивном режиме (например, по методу акустической эмиссии), так и в активном (с излучением зондирующих сигналов и их регистрацией сетью ультразвуковых преобразователей).

### 1.2.4 Использование волн Лэмба для оценки состояния материалов

Детальный анализ современных исследований, проводимых в мире, позволяет сделать вывод о том, что до успешной реализации были доведены системы на основе сети оптоволоконных датчиков (ячеек Брэгга), которые работают в режиме тензометрии [31–36]. Однако такие системы проводят оценку наличия/отсутствия дефектов непрямым образом; кроме того, технология производства, предусматривающая формование оптоволокна в КМ, существенно усложняет процесс изготовления и его стоимость.

Другим широким научным направлением во встроенном контроле является использование ультразвуковых колебаний в виде волн Лэмба для контроля пластин, оболочек, обшивок, что особенно актуально при контроле трубопроводов [37–40] и летательных аппаратов [41–45]. Одним из основных преимуществ

волн Лэмба является низкий коэффициент затухания, что позволяет волне распространяться на большие расстояния и тем самым контролировать детали больших размеров, уменьшить количество необходимых датчиков. Кроме того, данный подход позволяет обнаруживать повреждения напрямую — регистрируя изменения параметров распространяющейся волны, проходящей непосредственно через повреждения или вблизи них. Однако волны Лэмба имеют очень сложную природу [18; 46], что усложняет анализ результатов тестирования: наличие двух мод (асимметричной и симметричной), дисперсия, значительное количество порядков мод (сменяющих друг друга по мере роста частоты). Помимо этого, в деталях конечных размеров, а также при наличии подкрепляющих элементов (стрингеров, нервюр, лонжеронов и др.), возникает большое количество переотражений, которые также усложняют анализ и интерпретацию данных. Несмотря на данные сложности, преимущества встроенных систем контроля на основе ультразвуковых волн Лэмба (компактность, возможность прямого обнаружения дефектов, большие размеры контролируемых площадей) являются достаточно весомыми, что актуализирует проведение исследований по данному научному направлению.

Разработка аналогичных систем для металлических изделий также является актуальной. Благодаря изотропным свойствам и меньшему затуханию волн Лэмба в металлах, отработка новых подходов обнаружения повреждений на металлических образцах выполняется проще: выше соотношение сигнал/шум и повторяемость экспериментальных данных, более прост аппарат обработки и анализа сигналов и др. Так, например, метод обратимости во времени (Time reversal), позволяет обнаруживать повреждения в различных материалах без использования базового состояния (набора сигналов для исходного неповрежденного состояния), а основываясь на возмущениях, вносимых в процесс распространение волны Лэмба дефектами и повреждениями.

Последнее время можно встретить все большее количество работ, посвященных исследованию ультразвуковых волн Лэмба для применения в задачах контроля. Исследуются различные аспекты ультразвукового контроля, в том числе: слежение за зарождением и распространением трещин [47], анализ механических характеристик материалов [48; 49], обнаружение ударных повреждений в композиционных материалах [50], анализ оптимального расположения

сетей ультразвуковых преобразователей [51–53]. Однако необходим учет множества факторов: стабильность клеевого слоя и деградация его свойств [54; 55], температурные девиации [56; 57], отказ датчиков [58] и др.

В работе [52] авторами изучены особенности расположения и формы сети ультразвуковых преобразователей для более надежной локации дефектов. Многие исследования в области определения взаимного расположения излучателей и приёмников волн Лэмба показывают, что если используется информация только от волн, проходящих напрямую от источника к детектору, то чувствительность к дефектам, расположенным вне траектории прохождения прямой волны, значительно падает. Например, расположение источника УЗ-волн близко к границам (краям) образца приводит к увеличению количества отражённых сигналов, регистрируемых на приёмнике. В то же время расстояние между парой пьезоэлементов должна выбираться такой, чтобы избежать значительного уменьшения амплитуды, что приведёт к малому соотношению сигнал/шум.

Значительное количество методов было разработано для исследования оптимального расположения сенсоров с целью контроля структурного состояния материала. Применяется множество разнообразных алгоритмов для решения задач, например, алгоритмы классической оптимизации (метод Ньютона, линейное и нелинейное программирование), так называемые «мягкие вычисления» (генетический алгоритм, алгоритм модельного обучения нейронных сетей) и др. Моделируется полное двумерное поле распространения волн Лэмба в конструкции с дефектом при условии заданного местоположения источника волн и всех возможных положений приёмников. Анализ выбора места расположения сенсоров основан на областях, в которых распространение волны от источника до сенсора будет более простым и естественным, а также будет показывать наибольшую изменчивость сигнала в зависимости от присутствия дефектов. Данная модель использует процедуру численного моделирования распространения волн Лэмб в алюминиевой пластине с прямоугольным жёлобом и реальными усталостными трещинами. Результаты, полученные при моделировании, были подтверждены в реальном эксперименте с использованием керамических пьезоэлементов и лазерной виброметрии. По итогам исследований был сделан вывод, что для обнаружения дефектов по величине амплитуды наиболее эффективным образом необходимо анализировать только первые два волновых пакета. Все последующие имеют уже более сложную структуру, так как содержат значительное количество переотражений, а также затухающий по уровню сигнал.

В исследовании [55] рассматриваются факторы, специфичные для армированных волокнами композиционных материалов, влияющие на процесс распространения волн Лэмба. Так при использовании волн Лэмба для мониторинга состояния материалов в процессе эксплуатации необходима компенсация изменений сигнала, которые не относятся к формированию и присутствию дефектов, а вызваны влиянием окружающей среды (температура, влажность, воздействие механических нагрузок и их комбинации). Очевидно, что определённые внешние условия, а также их комбинации способны оказывать влияние на какую-либо из частей встроенной установки для мониторинга (датчики и излучатели, клеевое соединение, контролируемые и смежные конструкции, все соединительные элементы и периферийные устройства), из-за чего происходит изменение параметров регистрируемого сигнала. Поэтому при разработке системы SHM к ней предъявляются требования обеспечения стабильной работы при любых возможных нагрузках и условиях окружающей среды, которые могут возникать в период эксплуатации. Изучена анизотропия свойств композиционных материалов и ее влияние на скорость распространения волн, исследовано влияние медленно аккумулируемых трещин (в комбинации с возможным влиянием усталостного нагружения на сенсоры) на процесс распространения волн Лэмба в многослойном армированном полимерном композите.

В статье [59] представлены результаты разработок по программной реализации трёхмерного компонентного анализа компонент спектра с использованием пьезоэлементов (Piezo-Enabled Spectral Element Analysis) для моделирования распространения ультразвуковых волн в конструкциях из композиционных материалов. Данный анализ позволяет решать основные электромеханические уравнения для произвольно выбранных входных напряжений на пьезоэлемент и выходных напряжений на пьезодатчиках. В случае моделирования слоистых композиционных материалов, использование одного элемента на один слой является затратным для вычислений, а усреднение свойств материала может дать крайне неточные результаты, поэтому вводится метод спектральных компонент. Методика позволяет использовать комбинированную процедуру (узловые квадратуры и правило Симпсона для численного интегрирования) для численного расчета матрицы жёсткости.

В исследовании [60] рассмотрен вопрос неразрушающего контроля и обнаружения коррозионных повреждений в труднодоступных областях конструкций

с помощью ультразвуковых направленных волн. С использованием стандартных преобразователей генерировали две моды волн Лэмба для мониторинга всей конструкции. Показано, что распространение и взаимодействие упругих волн зависит от толщины материала. Проведены численные эксперименты с использованием метода конечных разностей для визуализации процессов распространения волн и передачи энергии по толщине образца. Лабораторные испытания проводили на стальных образцах с подфрезеровками, имитирующими воздействие коррозии, с последующим натурным испытанием на панели с коррозионным повреждением, полученным по ускоренной методике. Утонение было обнаружено после детального анализа полученных сигналов, при этом также показано хорошее соответствие теоретических и экспериментальных результатов.

### **1.3 Применение метода корреляции цифровых изображений для исследования процессов усталости материалов**

#### **1.3.1 Общие понятия метода корреляции цифровых изображений**

Метод корреляции цифровых изображений (Digital Image Correlation—DIC) позволяет оценивать перемещение участков поверхности образца во время механических испытаний на растяжение, сжатие, изгиб. Корреляция цифровых изображений является эффективным бесконтактным методом измерения полей перемещений и деформаций на поверхности исследуемых объектов. Кроме того, при реализации трёхмерной системы возможна оценка ещё и формы поверхности.

Принцип работы алгоритма расчёта поля деформаций схематично показан на рисунке 1.10.

Для проведения вычислений необходимо получить изображения поверхности образца в двух состояниях — исходном (недеформированном) и после приращения деформации. При этом для корректного расчета смещений необходимо иметь неоднородную контрастную поверхность — спекл (например, белый фон со случайным расположением на нем черных точек). Затем на исходном изображении выбирается окно (элементарная площадка) размером  $n \times n$  пикселей, для которых далее будут определяться смещения локальных участков поверхности, вызванные деформацией. Алгоритм оценки смещений площадки на изображении деформированного образца относительно исходного основано

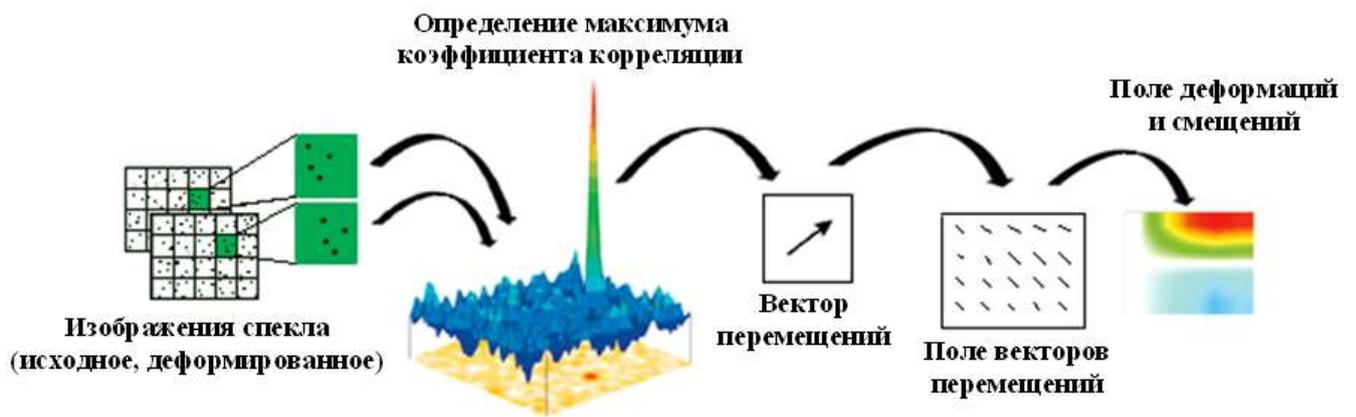


Рисунок 1.10 — Принцип работы алгоритма корреляции цифровых изображений для расчёта полей деформаций.

на использовании оценки в виде [61]:

$$v = \operatorname{arccotr} J(F_1, F_2(v)) \quad (1.8)$$

где  $v$  — геометрические параметры, имеющие смысл сдвигов по декартовым координатам, углу, масштабу и т.д.;  $F_1$  — изображение объекта после деформации;  $F_2(v)$  — исходное изображение (недеформированное);  $J$  — мера близости изображения объекта после деформации и исходного изображения объекта.

В качестве одной из возможных мер близости двух площадок на изображениях возможно использование функции взаимной корреляции [62]. Тогда максимум коэффициента взаимной корреляции соответствует положению окна (элементарной площадки) на изображении деформированной поверхности. Таким образом строится вектор смещения локального участка. Затем элементарная площадка на исходном изображении сдвигается на заданный шаг  $r$  и процедура поиска корреляционного максимума повторяется. Совокупность векторов смещений составляет векторное поле перемещений участков поверхности образца. Последующая процедура численного дифференцирования смещений позволяет определить различные компоненты деформаций [63–66], как плоскостных — для двумерного метода, так и внеплоскостных — для трехмерного метода.

Для более детального ознакомления с методом корреляции цифровых изображений можно обратиться к книге М. Саттона [67] или монографии, подготовленной коллективом под руководством С. В. Панина [68].

### 1.3.2 Оценка параметров деформирования, роста трещины и разрушения материалов с использованием метода корреляции цифровых изображений

Успешные исследования в области определения величины закрытия трещины при помощи корреляции цифровых изображений в процессе циклических испытаний (при наличии единичного цикла перегрузки, для образцов разной толщины, с целью исследования механизма распространения трещины) продемонстрированы в работах [69–72].

Другой широко используемый подход основан на предположении, что на процесс роста трещины оказывает влияние зона пластичности и ее эволюция. Концепция зоны пластичности служит для объяснения эффекта замедления трещины вследствие приложения единичного цикла перегрузки во время циклического испытания с постоянной амплитудой.

Аналитическая формулировка процесса роста трещины на микроуровне была разработана в [73]. Если при помощи традиционно используемых моделей закон роста трещины формулируется в зависимости от количества циклов нагружения  $da/dN$ , то в описываемый подход основан на определении кинетики роста трещины в каждый конкретный момент времени в процессе нагружения, т. е. с использованием параметра  $da/dt$ . Основным предположением данной модели является то, что рост трещины зависит от взаимодействия монотонной и циклической пластических зон, размеры которых зависят от уровня закрытия трещины. Получение данных о распределении деформаций и напряжений вблизи вершины трещины при помощи оптических методов, проводилось рядом авторов [74–77].

Дальнейшим продолжением развития метода корреляции цифровых изображений является использование его не только для измерения величины закрытия или построения полей деформаций, но и для расчета параметров механики разрушения, таких как  $J$ -интеграл и коэффициент интенсивности напряжений  $K$ .

$J$ -интеграл, предложенный независимо Г.П. Черепановым и Дж. Райсом [78; 79] определяется как контурный интеграл, не зависящий от пути интегрирования, который характеризует поле напряжений/деформаций в окрестности вершины трещины при упругом и пластическом поведении материала. Обычно  $J$ -интеграл определяется по любому замкнутому контуру, включающему в себя вершину трещины. Преимуществом применения  $J$ -интеграла

в расчетах является возможность его использования в случаях больших пластических деформаций материала (когда размер пластической зоны превышает 20% от длины трещины).

В работах [80–83] авторы использовали метод DIC для расчета полей деформаций на поверхности материала, а затем импортировали это поле в конечно-элементную модель для последующего расчета  $J$ -интеграла.

Определение КИН с использованием DIC может быть выполнено с использованием трех подходов:

1. на основании полей смещений, полученных методом DIC, совмещенных с результатами решения степенных рядов Вестергарда и Вильямса [77; 84–86];
2. на основании показаний программных датчиков деформаций в методе DIC, размещаемых на берегах раскрывающейся трещины [70; 87; 88];
3. на основе расчетов  $J$ -интеграла [89–91].

#### **1.4 Постановка задачи исследования**

Целью данного диссертационного исследования является: разработка подхода и аппаратно-программного комплекса для контроля состояния армированных полимерных и металлических композитов при усталостном разрушении оптическим и акустическим методами.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

1. Разработать комбинированный оптико-акустический метод контроля поврежденности металлических и армированных полимерных материалов, основанный на использовании метода корреляции цифровых изображений и волн Лэмба, включая аппаратную реализацию, алгоритмы и методики обработки сигналов и интерпретации данных.
2. На основе метода корреляции цифровых изображений разработать лабораторный исследовательско-диагностический комплекс для мониторинга усталостного разрушения, включая процесс роста усталостных трещин, а также оценки состояния конструкционных материалов в терминах механики разрушения.
3. С целью исследования функционирования разработанных аппаратно-программных комплексов провести прикладные исследования по разрушению металлических сплавов, в том числе со сварными соединениями, и армированных полимерных композиционных материалов при циклическом нагружении.

## **Глава 2. Развитие комбинированного оптико-акустического метода для мониторинга процессов усталостного разрушения конструкционных материалов**

В главе 2 представлены результаты разработки аппаратно-программного комплекса для комбинированного оптико-акустического мониторинга (на основе оптического метода корреляции цифровых изображений и акустического метода контроля волнами Лэмба) состояния конструкционных материалов *in situ* в процессе циклического нагружения и его последующего тестирования на примере высокопрочного алюминиевого сплава со сварными соединениями.

### **2.1 Разработка испытательно-мониторингового комплекса (ИМК) для контроля (оценки) состояния конструкционных материалов комбинированным оптико-акустическим методом в процессе нагружения**

#### **2.1.1 Разработка принципиальной схемы ИМК**

Разрабатываемый комплекс предназначен для проведения испытаний конструкционных материалов при квазистатическом и циклическом нагружении, в том числе при сложных режимах приложения нагрузки, и мониторинга (оценки) их механического состояния *in situ*.

Разработка ИМК проводилась исходя из необходимости удовлетворения следующих требований:

1. Автоматизированный режим проведения испытания с заданными параметрами нагружения, включая реализацию сложного характера нагружения: приложение единичных циклов перегрузки, разгрузки, выдержка при заданном уровне нагрузки, ступенчатое нагружение, а также случайные спектры нагружения.

2. Мониторинг состояния конструкционных материалов при комбинированном использовании акустического и оптического методов в процессе испытания.

3. Получение количественной оценки изменения состояния материала, вызванного развитием деформации, накоплением повреждений и разрушением, путем расчета совокупности информативных параметров на основе анализа оптических изображений и акустических сигналов.

Для решения поставленных задач была разработана принципиальная схема комплекса, изображенная на рисунке 2.1. На представленной схеме изображены,

как аппаратные средства, так и программные компоненты, служащие для реализации обозначенных требований.

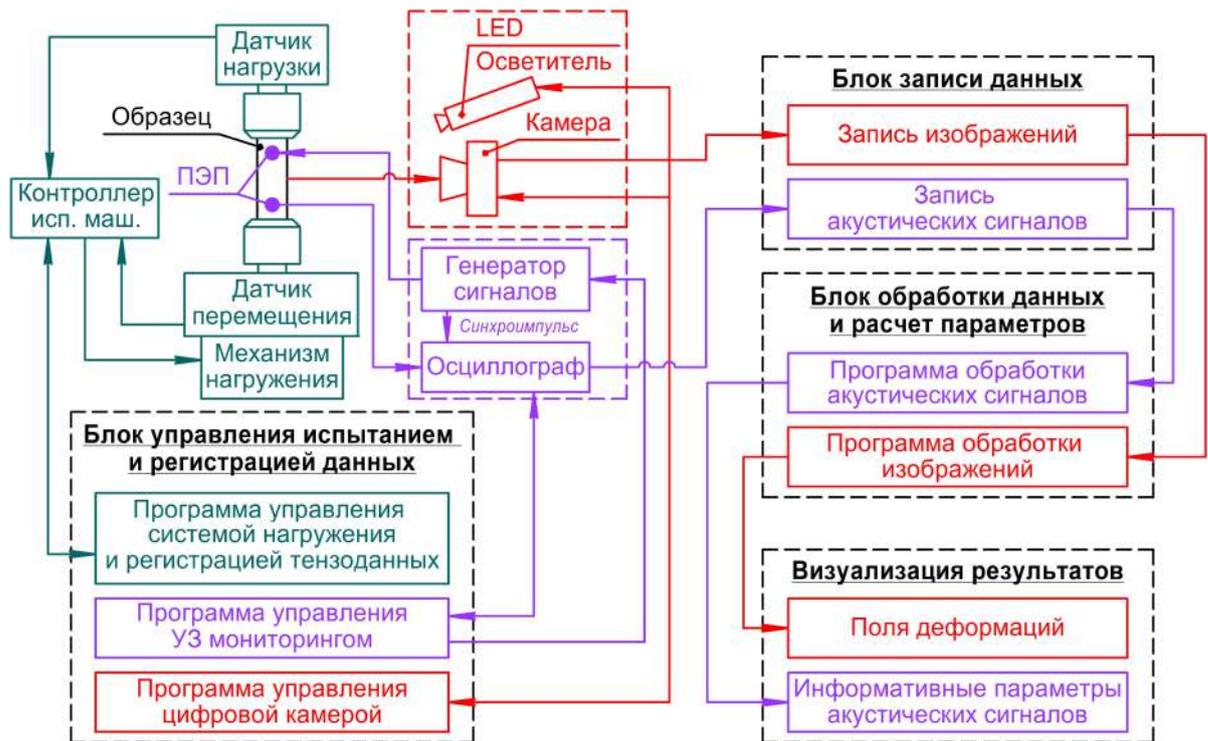


Рисунок 2.1 — Принципиальная схема ИМК для оценки механического состояния конструкционных материалов комбинированным оптическим (на основе DIC) и ультразвуковым (на основе волн Лэмба) методом. Комплекс включает три функциональные системы: (1) система нагружения (показана зеленым цветом на схеме), (2) система ультразвукового мониторинга (сиреневый), (3) система оптического мониторинга (красный).

Разрабатываемый комплекс включает в себя три системы, выполняющие различные функциональные задачи, и выделенные на рисунке 2.1 различным цветом. Аппаратная часть систем включает в себя:

- *оборудование для реализации процесса нагружения*, состоящее из испытательной машины (ИМ) в состав которой входят:

- контроллер ИМ, взаимодействующий с ПК и осуществляющий:

- \* сбор данных (показаний) с датчиков ИМ;
- \* считывание данных о параметрах механических испытаний с помощью программы «Управления системой нагружения и регистрации данных»;
- \* передачу заданных оператором параметров проведения испытаний через программу «Управления системой нагружения и регистрации данных»;

- \* управление механизмом нагружения на основе полученных данных о параметрах испытания и показаний датчиков;
- датчик нагрузки — измеряет величину приложенной к образцу нагрузки и передает показания измерений на контроллер;
- датчик перемещения — определяет координату (положение) подвижного захвата и передает показания измерений на контроллер;
- механизм нагружения — управляет приводами, осуществляющими перемещение подвижного захвата ИМ.
- *оборудование для проведения ультразвукового мониторинга* — предназначено для генерации и регистрации зондирующего акустического сигнала, включающее:
  - генератор акустических сигналов (ГАС) — формирует УЗ-сигналы с заданными параметрами, которые далее подаются на первый пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП). Зондирующий импульс одновременно является и сигналом синхронизации записи регистрируемых данных акустического контроля осциллографом. Параметры зондирующего УЗ-сигнала для ГАС задаются оператором и далее передаются программе «Управления УЗ-мониторингом»;
  - осциллограф (Осцл.) — предназначен для:
    - \* записи акустических сигналов, принимаемых вторым ПЭП, а также (опорного) сигнала, поступающего напрямую от ГАС, который также выполняет роль синхронизирующего импульса;
    - \* передачу в программный блок записи данных зарегистрированных акустических сигналов для их дальнейшего хранения в памяти ПК;
    - \* передачи программе управления УЗ-мониторингом (синхро) сигнала о завершении процедуры записи данных;
 Параметры регистрации акустических данных, также задаваемые оператором, передаются на Осцл. с помощью программы управления УЗ-мониторингом;
  - два или более ПЭП, один из которых предназначен для формирования УЗ-волны в зондируемом образце, другой(ие) — для регистрации ультразвуковых колебаний, прошедших через рабочую зону образца.
  - *оборудование для оптического мониторинга*, предназначенное для получения изображений поверхности образца, включающее:

- цифровую камеру (ЦК). Параметры фотографирования задаются оператором и передаются на ЦК программой управления цифровой камерой. ЦК выполняет следующие функции:
  - \* производит фотографирование поверхности образца;
  - \* передает зарегистрированные изображения в блок записи данных для их хранения в памяти ПК;
  - \* отправляет программе управления цифровой камерой управляющий (синхро)сигнал завершения процесса записи изображений;
- осветитель (Осв.) – служит для равномерного освещения поверхности образца.

Программная часть разработанного комплекса содержит несколько взаимодействующих друг с другом программ, как и описанные ранее аппаратные средства отвечают за различные функциональные задачи и представлены на схеме на рисунке 2.1 различными цветами. Кроме того на схеме программы объединены в программные блоки, обведенные пунктирными линиями. Комплекс содержит 4 программных блока:

1. Программный блок управления испытанием и регистрацией данных включает 3 программы:

а) Программа управления нагружением и регистрацией тензоданных (Программа УНиРТ) — предназначена для задания параметров нагружения, управления испытательной машиной с помощью цифрового контроллера ИМ, а также регистрации показаний с датчиков нагрузки и перемещения ИМ. Программа УНиРТ позволяет осуществлять полный контроль процесса испытания с возможностью реализации сложных схем нагружения. При функционировании программы используются следующие данные:

1) Параметры испытаний, задаваемые оператором и передаваемые на контроллер ИМ, включают параметры нагружения, а именно:

- тип режима нагружения («мягкий»/«жесткий»);
- частота нагружения;
- максимальная и минимальная величина нагрузки;
- количество циклов;
- другая служебная информация.

2) Данные, принимаемые с контроллера ИМ:

- данные (показания) с датчиков нагрузки и перемещения подвижного захвата;
- текущее количество циклов нагружения;
- длительность по времени проведения испытания;
- другая служебная информация;

К принимаемым программой управляющим воздействиям относится (синхро)сигнал от осциллографа об окончании процесса записи акустических сигналов.

б) Программа управления УЗ мониторингом (Программа УУЗМ) — служит для управления процессом УЗ-зондирования образца посредством передачи и регистрации информационных и управляющих сигналов на ГАС и Осцл. При функционировании программы используются следующие данные:

1) Информация, задаваемая пользователем и передаваемая далее на ГАС, включает параметры формируемого зондирующего акустического сигнала:

- частота;
- длительность;
- форма;
- амплитуда;
- количество серий повторения;

2) Данные, задаваемые пользователем и передаваемые на Осцл., включают параметры записи акустического сигнала:

- диапазон измеряемых значений по каждому каналу;
- длительность сигнала;

К принимаемым программой управляющим воздействиям относится (синхро)сигнал от осциллографа об окончании процесса записи акустических сигналов.

в) Программа управления ЦК (Программа УЦК) — предназначена для управления процессом фотографирования. Синхронизация камеры осуществляется путем подачи соответствующего сигнала, инициализирующего процесс фотографирования поверхности. При функционировании программы используются следующие данные и управляющие воздействия:

- 1) Данные, задаваемые пользователем и передаваемые на ЦК — параметры фотографирования:
  - ISO;
  - диафрагма;
  - выдержка.
- 2) Управляющие сигналы:
  - синхроимпульс для старта фотографирования;
  - синхросигнал от камеры о завершении процесса фотосъемки.
2. Программный блок записи данных (Программный блок ЗД) включает:
  - а) Подпрограмму записи оптических сигналов, которая предназначена для записи изображений поверхности образцов с цифровой камеры в память ПК в заданном пользователем формате.
  - б) Подпрограмму записи акустических сигналов, которая предназначена для записи в память ПК регистрируемых УЗ-сигналов, поступающих с цифрового осциллографа.
3. Программный блок обработки данных и расчета информативных параметров (Программный блок ОДиРИП) включает:
  - а) Программу обработки акустических сигналов – предназначена для расчета различных информативных параметров УЗ-зондирующих сигналов, записанных в память ПК на предыдущих этапах работы комплекса (подробнее о рассчитываемых параметрах в разделе 2.1.7).
  - б) Программу обработки изображений – предназначена для расчета полей перемещений и деформаций по изображениям, записанным в память ПК на предыдущем этапе работы комплекса, с использованием метода корреляции цифровых изображений.
4. Программный блок визуализации результатов расчета (Программный блок ВРР) включает:
  - а) Программу визуализации векторных полей и карт деформации, которая предназначена для вывода на экран (отрисовки):
    - результатов расчета векторных полей;
    - параметров векторного поля (карты деформаций).
  - б) Программу визуализации информативных параметров акустических сигналов, которая предназначена для отображения в виде графиков

изменения информативных параметров УЗ-сигналов, как функции величины наработки (циклического нагружения).

### 2.1.2 Разработка алгоритма работы ИМК

Алгоритм работы аппаратно-программного комплекса представлен на рисунке 2.2.

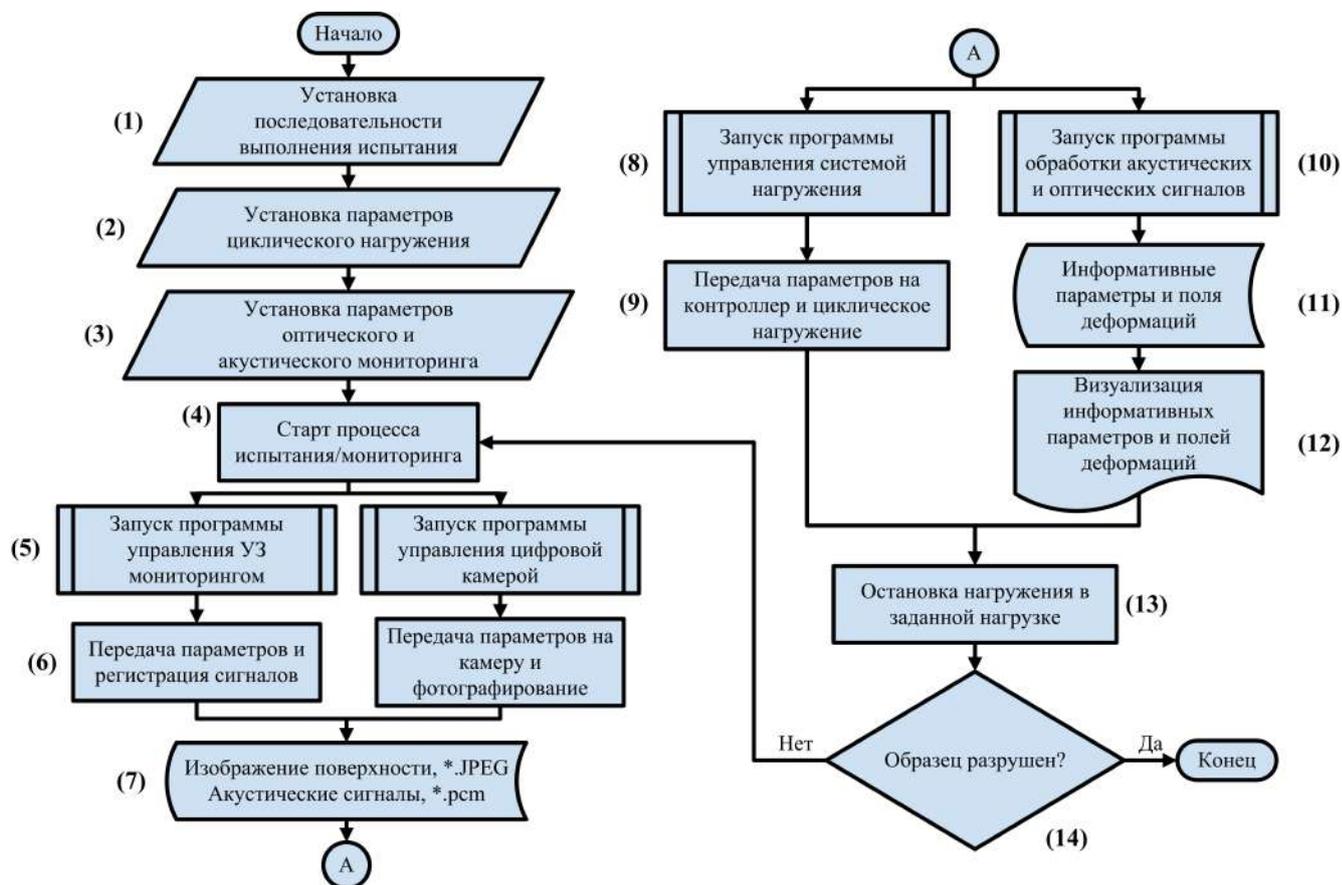


Рисунок 2.2 — Алгоритм работы испытательно-мониторингового комплекса для оценки механического состояния комбинированным оптико-акустическим методом.

Первоначально пользователем задаются параметры процесса испытания блоки (Бл. 1–Бл. 3):

- *Бл. 1* – последовательность выполнения операций (включая акустический и оптический мониторинг) при проведении усталостных испытаний;
- *Бл. 2* – параметры циклического нагружения (максимальная/минимальная нагрузка, частота нагружения, количество циклов, начальная фаза нагружения и др.);
- *Бл. 3* – параметры акустического (частота зондирующего сигнала, диапазон измерений сигнала по каждому каналу, форма зондирующего сигнала,

длительность, маска имени файлов и др.) и оптического (время выдержки, светочувствительность, параметр диафрагмы, формат представления данных и др.) мониторинга.

После этого выполняется старт процесса испытания/мониторинга (Бл. 4). Проведение дальнейших операций уже не требует участия пользователя (оператора). До начала нагружения производится запись акустических сигналов и изображений поверхности исходного (недеформированного) образца. Для этого выполняется вызов соответствующих программ, которые работают параллельно (Бл. 5–Бл. 7).

После регистрации начальных данных (исходное состояние) вызывается программа управления системой нагружения (Бл. 8), которая передает введенные пользователем параметры испытаний контроллеру испытательной машины и запускает процесс циклического нагружения (Бл. 9). Одновременно производится расчет информативных параметров акустических и оптических сигналов при помощи соответствующих программных модулей (Бл. 10) с их последующей записью в память ПК (Бл. 11) и визуализацией на экране ПК (Бл. 12) в виде графиков и векторных полей (карт деформаций).

После достижения заданного количества циклов процесс нагружения останавливается (Бл. 13). При этом выполняется проверка условия целостности (разрушения) образца, согласно показаниям датчиков перемещения и нагрузки испытательной машины (Бл. 14). Если образец не разрушен, то процесс испытания/мониторинга возобновляется, начиная с (Бл. 4), после которого вновь следует процедура регистрации оптических и акустических данных. В результате регистрируются данные, характеризующие состояние образца при текущей величине циклической наработки. Если образец при проверке оказывается разрушенным (Бл. 14), то процесс испытания/мониторинга завершается.

### **2.1.3 Аппаратная реализация ИМК**

Для реализации испытательно-мониторингового комплекса на основе предложенной функциональной схемы и алгоритма работы аппаратные средства должны удовлетворять следующим требованиям:

1. *Испытательная машина (ИМ):*

- предельная реализуемая в испытании нагрузка — не менее 100 кН;
- частота циклического нагружения — в диапазоне 1-10 Гц с возможностью дискретной регулировки;

– оснащение цифровым контроллером с возможностью подключения к ПК и управлением при помощи ПК.

2. *Цифровая камера (ЦК):*

- размер матрицы — не менее 15 Мп с кроп-фактором не менее 2 (4/3 in.);
- частота фотографирования — не менее 2 кадра/с
- скорость работы затвора (выдержка) — в диапазоне 1/1000–3 с;
- формат записи изображений — JPEG или RAW;
- возможность подключения и управление камерой через ПК.

3. *Осветитель (Освет.):*

- формирование равномерного освещения на площади 30×30 см;
- возможность закрепления рассеивающего зонта;
- цветовая температура — близкая к солнечной (4500–5500 К);
- минимальный нагрев освещаемой поверхности и самого осветителя;
- возможность подключения и управления осветителем через ПК.

4. *Генератор сигналов (ГАС):*

- генерация сигналов произвольной формы (формируемых с помощью ПК);
- частота дискретизации — не менее 5 МГц с вертикальным разрешением не менее 8 бит;
- амплитуда генерируемого сигнала — не менее 10 В;
- возможность подключения и управление генератором через ПК.

5. *Осциллограф (Осцил.):*

- частота дискретизации — не менее 5 МГц с вертикальным разрешением не менее 8 бит;
- возможность подключения и управление осциллографом через ПК.

6. *Пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП):*

- геометрические размеры — не более 14 мм в диаметре;
- материал подложки — нержавеющая сталь (во избежание деформирования керамики и развития коррозии);
- диапазон генерируемых частот — от 10 кГц до 500 кГц;
- низкая стоимость со стабильными геометрическими и частотными свойствами.

С учетом вышеописанных технических требований для решения поставленной задачи создания испытательно-мониторингового комплекса могут быть эффективно использованы следующие аппаратные средства:

1. Испытательная машина BISS UTM 150 (Biss Ltd., Индия) на базе контроллера SS2370 со встроенными датчиками нагрузки и перемещения нижнего подвижного штока (захвата), а также сервогидравлическим механизмом нагружения, имеющая следующие характеристики:

- диапазон нагрузок в испытании — от -100 до 100 кН со средней точностью 0,1%;
- диапазон частот при циклических испытаниях — 0,001–20 Гц;
- тип контроллера — BISS SS2370;
- подключение к ПК через USB интерфейс;
- частота дискретизации при регистрации данных с датчиков ИМ — до 10000 Гц;
- возможность адаптивного контроля процесса циклического нагружения;
- возможность программного управления испытательной машины реализуется через USB интерфейс при помощи BISS<sup>®</sup> SDK, предоставляемого разработчиком, на языке C++.

2. Зеркальная цифровая фотокамера Canon EOS 700D, оснащенная объективом Canon EF 70-300 mm 4-5.6L, имеющая следующие характеристики:

- матрица — CMOS 5184×3456 пикселей (17,90 Мп), 22.3×14.9 мм (APS-C);
- диапазон светочувствительности — ISO 100–12800;
- время выдержки — 1/4000–30 с;
- максимальная частота фотосъемки — 5 кадров/с;
- возможность программного управления цифровой фотокамерой через USB интерфейс при помощи Canon<sup>®</sup> SDK, предоставляемого разработчиком, на языке C++.

3. Для подсветки поверхности образца использовался студийный светодиодный осветитель Jinbei EF-100 LED Sun Light (Shanghai Jinbei Photographic Equipments Co. Ltd, Китай), имеющий следующие характеристики:

- цветовая температура — 5500 К;
- напряжение питания — 220 В;
- мощность — 100 Вт;
- освещение реализовано на основе матрицы сверхярких светодиодов CREE площадью 39×39 мм.

4. 2-х канальный цифровой осциллограф с функцией генератора на отдельном канале Handyscope HS5-220 (TiePie engineering, Нидерланды), имеющий следующие характеристики:

- При регистрации сигналов: частота дискретизации — 20 МГц, вертикальное разрешение 14 бит;
- При генерации сигналов:
  - форма генерируемого сигнала — произвольная в диапазоне частот от 1 мкГц до 40 МГц;
  - частота дискретизации — 200 МГц вертикальным разрешением 14 бит;
  - амплитуда сигнала — до 12 В (или 24 Vpp);
  - возможность программного управления цифровой фотокамерой осуществляется через USB интерфейс при помощи LibTiePie<sup>®</sup> SDK, предоставляемого производителем, на языке C++.

5. Пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) AW1E12G-190EFL1Z (Audiowell Corp, Китай).

- диаметр — 9 мм;
- толщина — 0,19 мм;
- материал подложки — нержавеющей сталь SUS304;
- диаметр подложки — 12 мм;
- толщина подложки — 0,2 мм;
- максимальное входное напряжение — 30 Vpp;
- резонансная частота —  $19.0 \pm 1.5$  кГц;
- рабочий диапазон частот — 5 кГц–1 МГц.

6. Персональный компьютер:

- процессор — AMD A6-5400K, два ядра, два потока;
- базовая частота процессора — 3,6 ГГц;
- ОЗУ — 8 ГБ DDR3 1600 МГц;
- операционная система — Windows 7.

#### 2.1.4 Фиксация пьезоэлектрических элементов на поверхности образца

Пьезокерамические элементы AW1E12G-190EFL1Z фиксировали на поверхности при помощи двухкомпонентного эпоксидного адгезива «3M Scotch-Weld Epoxy Adhesive DP105» [92]. Для дополнительного повышения адгезионной прочности поверхности образца и стальной подложки ПЭП

предварительно зачищались наждачной шкуркой зернистостью Р600, а затем обезжиривались спиртом.

Вопрос стабильности свойств клеевого слоя в процессе проведения испытаний является немаловажным. В рамках методологических исследований было проведено тестирования целой серии клеевых составов, которое продемонстрировало наибольшую адгезивную прочность марок 3M Scotch-Weld Epoxy Adhesive DP105 и 3M Scotch-Weld Epoxy Adhesive DP490. При этом адгезив DP105 обладает удлинением до разрушения 120% и пределом прочности при растяжении 4 МПа согласно паспортным данным производителя [92]. Кроме того, данный тип клея обладает высокой адгезией как к композиционным материалам на основе стекло- и углеволокон, так и к металлическим сплавам. Все вышесказанное позволяет исключить возможность его разрушения в процессе статического или циклического нагружения [55].

### 2.1.5 Методика мониторинга состояния методом корреляции цифровых изображений

В рамках разрабатываемого ИМК для оптического мониторинга механического состояния материалов применяется метода корреляции цифровых изображений программная реализация которого выполнена в лаборатории МПКМ ИФМП СО РАН и в ИМК применяется в модернизированном виде для решения задач мониторинга.

Расчет полей деформаций по изображению поверхности основан на расчете смещений отдельных участков путем установления взаимной корреляции по вычислению взаимно корреляционной функции и поиске экстремума [64] по условию максимума коэффициента корреляции:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (I_1^{i,j} - \bar{I}_1) (I_2^{i,j} - \bar{I}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (I_1^{i,j} - \bar{I}_1)^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (I_2^{i,j} - \bar{I}_2)^2}} \quad (2.1)$$

где  $I_1^{i,j}$ ,  $I_2^{i,j}$  — яркости элементов (пикселей) сравниваемых участков изображений,  $\bar{I}_1$ ,  $\bar{I}_2$  — среднеарифметические значения элементов тех же участков,  $n$  — размер стороны площадки, для которой вычисляется коэффициент корреляции.

Перемещая площадку размером  $n \times n$ , находится такое ее положение, при котором значение  $K$  принимает максимальную величину. Вектор, соединяющий

начальное положение центра площадки и положение ее центра при максимальном значении корреляционного коэффициента, является вектором смещения участка поверхности образца. Серия таких векторов образует поле векторов смещений  $(u, v)$ , дифференцируя которое, рассчитываются поля деформаций [93]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y} \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)\end{aligned}\quad (2.2)$$

Дальнейшая обработка поля деформаций связана с интерполяцией для достижения субпиксельной точности [94; 95] и сглаживанием [96–98]. Дополнительным методом, используемым при расчете векторов, является использование матрицы жесткости по аналогии с методом конечных элементов [99–101].

Конечные значения различных компонент деформаций, т. е. информативных параметров (нормальные деформации —  $\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{yy}$ , сдвиговые деформации —  $\varepsilon_{xy}$ , главные деформации  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ) представляются в виде цветowych карт, совмещенных с изображением поверхности образца, а также в виде графиков зависимости информативного параметра от величины наработки.

### 2.1.6 Подбор параметров зондирующего акустического сигнала

Для акустического контроля образцов в качестве зондирующего сигнала был выбран сигнал в форме синусоиды, состоящий из 5 циклов, модулированных окном Хэннинга (рисунок 2.3а). Такой выбор обоснован результатами многочисленных тестовых экспериментов с различными вариантами формы и амплитуды сигнала (синусоидальный сигнал без модуляции, тета-функция, ступенчатая форма, пилообразная форма, модуляция функцией Гаусса и т. д.). При использовании УЗ-сигнала подобной формы удается достичь а) наибольшей амплитуды регистрируемого сигнала; б) наименьшего уровня шумов вследствие переотражений; в) незначительного искажения формы сигнала при прохождении в объеме материала, а также г) хорошей повторяемости результатов [102; 103]. Кроме того, применение модуляции обеспечивает существенное уменьшение амплитуды побочных пиков в частотном спектре (рисунок 2.3б), по сравнению с обычной синусоидальной формой сигнала, что, в свою очередь, снижает дисперсию волн.

Непосредственно перед проведением усталостных испытаний необходимо определять оптимальные частоты зондирующих ультразвуковых колебаний.

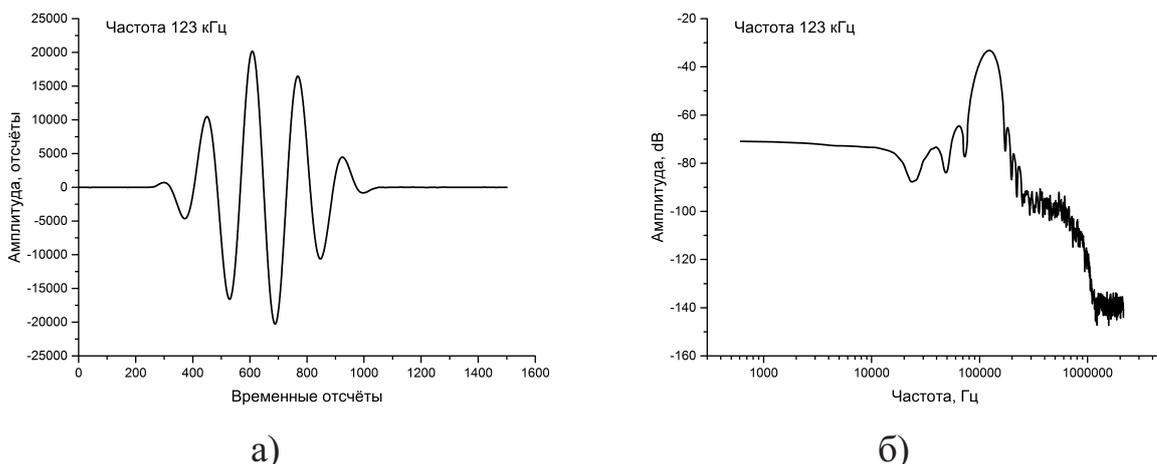


Рисунок 2.3 — (а) Форма зондирующего сигнала на частоте 123 кГц — 5 циклов синуса, модулированного окном Хеннинга, и (б) Фурье-спектр сигнала.

Значения резонансных частот зависят от геометрических размеров и формы образцов (интерференционный паттерн), механических (прежде всего, упругих) свойств материала, способа фиксации и расположение источника/приемника, а также, оказывающих определяющую роль, размеров и акустических свойств используемых пьезопреобразователей. Для решения данной задачи предлагается следующая методика поиска. Частота зондирующего сигнала изменяется в диапазоне 10–500 кГц с шагом в 1 кГц и для каждого измерения определяется амплитуда принимаемого сигнала (рисунок 2.4). График амплитудно-частотной характеристики позволяет определить оптимальные (резонансные) частоты для проведения УЗ-контроля, которые соответствуют экстремумам.

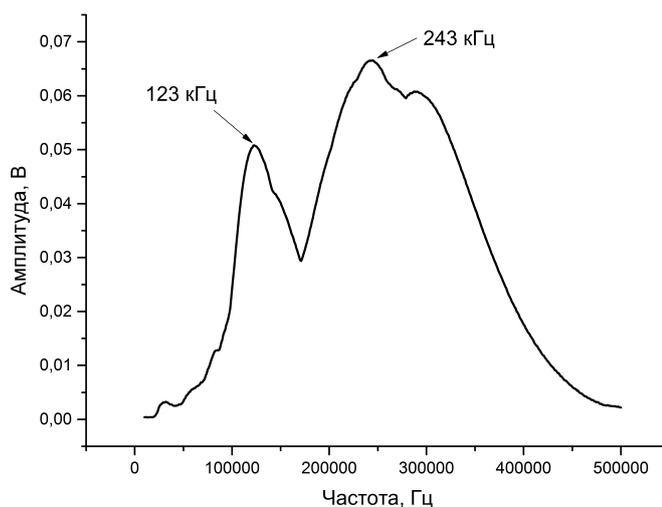


Рисунок 2.4 — Пример амплитудно-частотной характеристики при определении резонансных частот в используемой схеме УЗ-мониторинга. На приведенном примере максимумы соответствуют частотам 123 и 243 кГц.



рабочую зону образца, которые в дальнейшем используются в разрабатываемом ИМК.

Максимальное значение огибающей сигнала (обозначается  $MaxEnv$ ). Вычисление огибающей зондирующего УЗ-сигнала осуществлялось с использованием преобразования Гильберта в частотной области [104; 105]. Для этого на первом этапе проводится  $N$ -точечное дискретное преобразование Фурье (ДПФ) сигнала длительностью  $N$  отсчетов. Затем отсчеты  $X_c(m)$  спектра, соответствующие отрицательным частотам, то есть отсчеты с номерами  $N/2 + 1 \leq m \leq N - 1$ , приравняются нулю. После чего выполняется обратное  $N$ -точечное ДПФ. Полученный результат имеет действительную и мнимую части и является огибающей сигнала, для которой затем находится максимальное значение.

По сути, максимальное значение огибающей соответствует максимальному значению амплитуды сигнала. Известно, что чем больше неоднородностей встречает на своем пути, распространяющаяся в материала акустическая волна, тем выше коэффициент затухания. Следовательно, по мере увеличения степени поврежденности образца, амплитуда сигнала (максимальное значение огибающей) должна снижаться.

Нормированный коэффициент корреляции между базовым и текущим сигналами (обозначается  $NCC$ ). Коэффициент корреляции, в отличие от максимального значения огибающей сигнала, характеризует результат сравнения двух сигналов — опорного (получен до начала испытания, т. е. на неповрежденном образце) и текущего (принимаемый в процессе испытания). Таким образом, с использованием данного параметра становится возможным охарактеризовать степень схожести/различия двух сигналов по мере накопления повреждений в материале. Чем ближе значения данного параметра к «0», тем сильнее отличаются два сравниваемых сигнала. Значение параметра равное «1» свидетельствует об абсолютной идентичности, а «-1» — свидетельствует о зеркальном отражении текущего сигнала относительно исходного. Нормированный коэффициент корреляции вычисляется по следующей формуле:

$$NCC = \frac{\sum_{i=0}^N X_i Y_i}{\sqrt{\sum_{i=0}^N (X_i)^2 \sum_{i=0}^N (Y_i)^2}} \quad (2.3)$$

где  $X_i, Y_i$  — амплитуда опорного (неповрежденное состояние) и текущего (с некоторой степенью поврежденности) сигналов в момент  $i$  (номер отсчета),  $N$  — длительность записанного сигнала в отсчетах.

Второй центральный момент разности двух сигналов или дисперсия случайной величины (обозначается  $\mu_2$ ). Чтобы оценить изменения, происходящие в УЗ-сигнале по мере изменения структуры материала и появления дефектов, применяли оценку дисперсии разности огибающих УЗ-сигналов для исходного и текущего состояния образца согласно [106]. Примеры использования данного параметра для различных задач можно найти в [107–109]:

$$\mu_2 = D[X] = M[X^2] - (M[X])^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \Delta_i^2 - \frac{1}{N} \left( \sum_{i=0}^N \Delta_i \right)^2 \quad (2.4)$$

где  $\Delta_i = X_i - Y_i$  — разность между огибающими двух сигналов в точке  $i$ ,  $M[x]$  — математическое ожидание величины  $X$ ,  $N$  — длительность записанного сигнала в отсчетах.

В работе информативные параметры подвергались нормировке на диапазон от 0 до 1 для их дальнейшего корректного сравнения между собой. Для реализации процедуры нормирования использовалось следующее линейное преобразование:

$$y_i(x) = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (2.5)$$

где  $x_i$  — значение параметра на  $i$ -м отсчете,  $x_{max}$  и  $x_{min}$  — максимальное и минимальное значения параметра в указанном для нормирования диапазоне.

## 2.2 Тестирование разработанного испытательно-мониторингового комплекса на примере контроля состояния образцов алюминиевого сплава В96ц3Т12

Для проведения тестовых испытаний разработанного ИМК и предлагаемой методики количественной оценки состояния (степени поврежденности) материала в процессе циклического нагружения были использованы образцы из алюминиевого сплава В96ц3Т12. Выбор данного сплава основан на том, что он является достаточно перспективным в области авиастроения в конструкциях планеров, обшивках и других нагруженных элементах конструкции за счет высокого предела текучести и прочности. Однако его применение ограничено невысокими показателями трещиностойкости по сравнению, например, со

сплавом Д16Т. Поэтому в используемых в тестовом испытании образцах при наличии концентраторов напряжений в виде сварного соединения гарантировано распространение усталостных трещин и разнообразие процессов деформирования, которые необходимо выявлять при помощи акустического и оптического мониторинга.

Целью раздела по тестированию комплекса являлось исследовать функционирование разработанного испытательно-мониторингового комплекса для оценки степени поврежденности материала в процессе циклического нагружения на примере образцов сплава В96ц3Т12. Для этого проводился анализ изменений информативных параметров на основных (характерных) стадиях процессов деформации и разрушения при наличии концентратора напряжений в виде сварного шва.

### 2.2.1 Материал и методика тестирования

Для проведения испытаний на циклическое растяжение были подготовлены образцы сплава В96ц3Т12 двух видов: однородный (исходный) материал образца без сварного шва и образцы со сварным соединением, выполненным аргонодуговой сваркой. Все образцы вырезались в форме лопатки (Рисунок 2.6) из листа толщиной 4 мм.

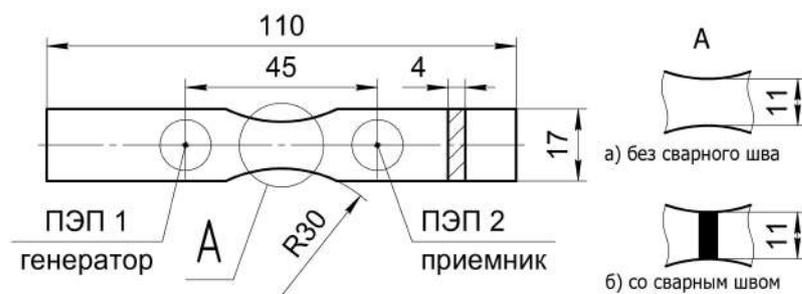


Рисунок 2.6 — Эскиз образца с ультразвуковыми преобразователями на поверхности. Образцы разделены на две группы: в исходном состоянии и со сварным соединением.

Для выбора оптимальных частот зондирующего акустического сигнала анализировали АЧХ приемного ПЭП (рисунок 2.7). На графике видны 3 локальных максимума, соответствующие частотам  $f=60$  кГц,  $f=150$  кГц и  $f=350$  кГц. Анализируя дисперсионные кривые, представленные в литературе [110], можно сделать вывод, что для данного образца максимум на частоте  $f=60$  кГц соответствует практически «чистой» моде  $A_0$ . Второй пик на частоте  $f=150$  кГц

является результатом совместной генерации одновременно симметричной и антисимметричной мод волны Лэмба. Третий пик ( $f=350$  кГц) соответствует доминирующей генерации моды  $S_0$ , тогда как амплитуда  $A_0$  мала.

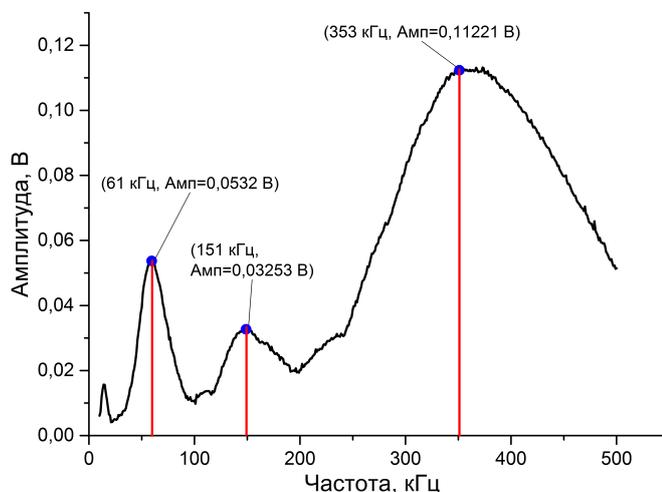


Рисунок 2.7 — АЧХ для образца из алюминиевого сплава В96цЗТ12 с тремя локальными максимумами: 60 кГц (мода  $A_0$ ), 150 кГц (моды  $A_0 + S_0$ ) и 350 кГц (мода  $S_0$ ).

В данном эксперименте для ультразвукового мониторинга были выбраны частоты  $f=60$  и  $f=350$  кГц, благодаря более высокой амплитуде и отсутствию дополнительных мод волны Лэмба.

В рамках циклических испытаний планировалось достичь значений наработки  $N \approx (0,5-1) \cdot 10^5$  циклов. Для исходных образцов без сварного шва была установлена максимальная нагрузка в цикле  $P_{max}$  соответствующая  $0,6\sigma_b$ ; для образца со сварным швом (с учетом достаточно хрупкого материала шва) —  $0,4\sigma_b$ . Асимметрия цикла  $R=0,1$ . Фотографирование поверхности образца и запись акустических сигналов производилась при максимальной нагрузке в цикле через каждые  $\Delta N=2000$  циклов.

### 2.2.2 Результаты тестирования

Для удобства сравнения двух типов образцов между собой количество приложенных циклов нагружения нормировалось в процентах от наработки, где 0% — начало испытания, а 100% — момент разрушения.

*Исходный образец без сварного соединения.* Результаты комбинированного мониторинга образцов без сварного соединения представлены в виде графиков изменения информативных параметров акустических сигналов на двух частотах (рисунок 2.8), изображений полей деформаций  $\varepsilon_1$  (рисунок 2.9), а также

графиков изменения информативных параметров оптического контроля — значений главных деформаций  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  (рисунок 2.10). Полученные характерные стадии разрушения являются следствием комплексного анализа всей полученной информации о состоянии образца по данным акустического и оптического методов.

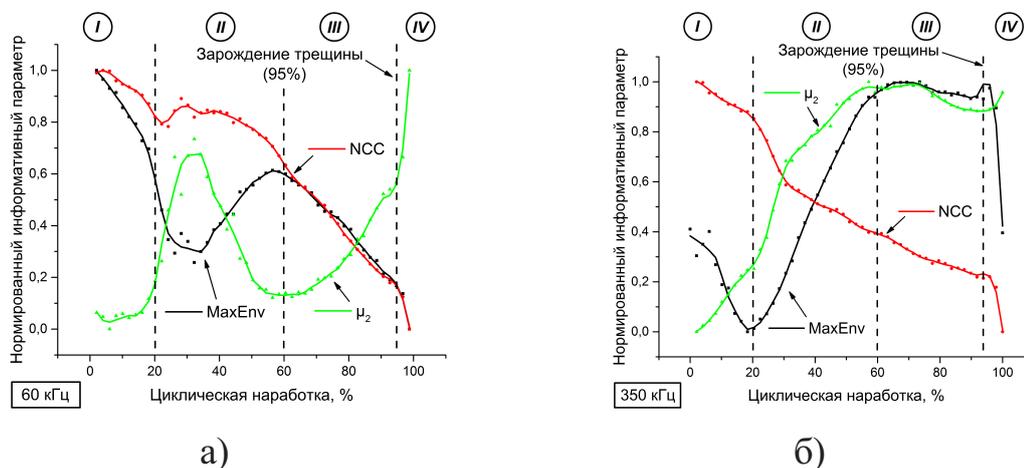


Рисунок 2.8 — Результаты ультразвукового контроля образца без сварного шва.

Графики изменения информативных параметров для частот (а)  $f=60$  кГц и (б)  $f=350$  кГц в зависимости от величины циклической наработки. Значения информативных параметров и количества циклов нормированы.

В частности, из представленных зависимостей параметров акустического сигнала для частоты  $f=60$  кГц (рисунок 2.8а) видно, что параметр NCC имеет стабильный нисходящий тренд на протяжении всего испытания, а после появления трещины начинает резко снижаться. Значения огибающей (MaxEnv) и дисперсии ( $\mu_2$ ) характеризуются наличием локальных максимумов и минимумов, связанных с протекающими в объеме образца структурными изменениями, которые в результате повлияли на характер распространения волн Лэмба, в том числе за счет изменения условий интерференции. Появление трещины, как и в случае с NCC, существенно сказывается на поведении данных параметров.

Графики параметров для частоты  $f=350$  кГц (рисунок 2.8б) также имеют характерные точки при величине наработки 20% и 60%. Изменения поведения информативных параметров на этих наработках выявляются и при низкой частоте зондирования, но выражены неявно.

Для образца без сварного соединения результаты оптического мониторинга представлены на рисунке 2.9 в виде полей деформаций  $\varepsilon_1$ . Локализация

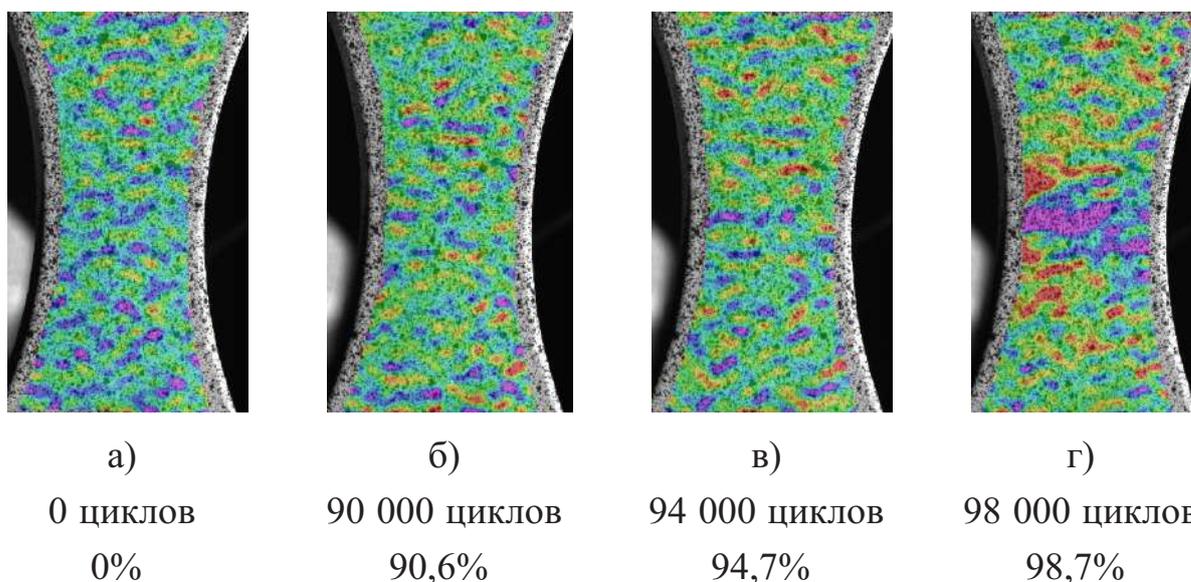


Рисунок 2.9 — Образец без сварного шва. Поля деформаций  $\varepsilon_1$ , полученных методом корреляции цифровых изображений при различной величине циклической наработки.

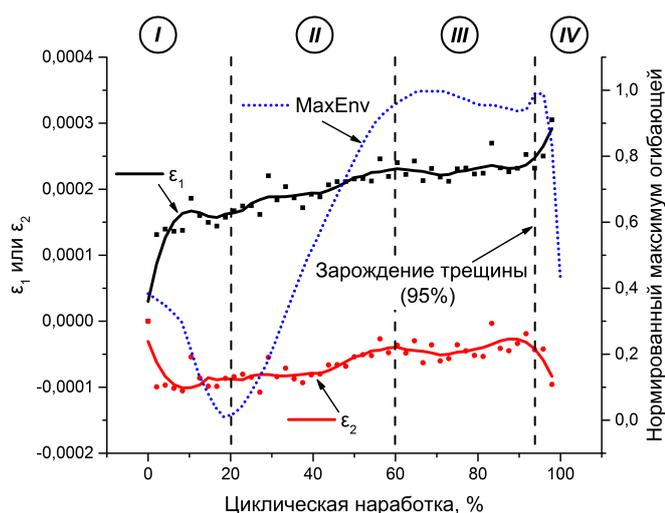


Рисунок 2.10 — Результаты оптического контроля образца без сварного шва. Графики изменения деформации  $\varepsilon_1$  в зависимости от величины циклической наработки, совмещенные с графиком MaxEnv.

деформаций, возникающая в центральной части, свидетельствует о зарождении усталостной трещины и соответствует наработке  $N=94\,000$ – $96\,000$  циклов (94,7–96,7%). Перед разрушением,  $N=98\,000$  циклов (98%), уровень возникающих деформаций возрастает, однако трещина при этом не выходит на поверхность образца. Данное изображение является последним в серии, после чего происходит усталостное разрушение на наработке 99 300 циклов (100%). Таким образом, рост трещины длится на протяжении 3 000–5 000 циклов после ее зарождения.

Полученные результаты комбинированного оптико-акустического мониторинга позволяют выявить 4 стадии усталостного разрушения, которые отмечены вертикальными линиями на графиках изменения информативных параметров: стадия I – формирование микрповреждений, распределенных по объему материала, изменяющих коэффициент затухания акустической волны, однако, не влияющих на интерференционный паттерн системы в целом; стадия II – продолжение процесса зарождения распределенных повреждений, их слияние с частичной локализацией на пути распространения волны, что приводит к изменению условий интерференции и росту значения  $\text{MaxEnv}$ ; стадия III – локализация развития повреждений в небольшой области (минимального сечения образца); стадия IV – зарождение и рост макротрещины.

*Образцы со сварным соединением.* Аналогичным образом представлены результаты комбинированного мониторинга образцов со сварными соединениями. Графики зависимостей информативных параметров ультразвуковых сигналов изображены на рисунке 2.11, поля деформаций  $\varepsilon_1$  на рисунке 2.12, а графики информативных параметров  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  на рисунке 2.13.

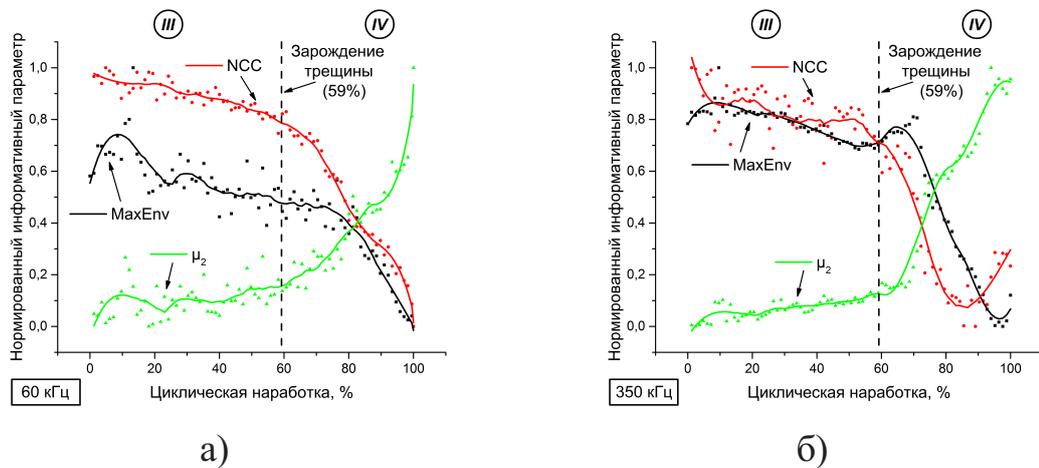


Рисунок 2.11 — Результаты ультразвукового контроля образца со сварным швом.

Графики изменения информативных параметров для частот (а)  $f=60$  кГц и (б)  $f=350$  кГц в зависимости от величины циклической наработки. Значения информативных параметров и количества циклов нормированы.

На частоте зондирования  $f=60$  кГц (рисунок 2.11а) все три параметра демонстрируют плавное монотонное изменение (либо рост, либо снижение), при этом сам момент зарождения небольшой единичной трещины несущественно влияет на поведение кривых информативных параметров  $\text{NCC}$  и  $\text{MaxEnv}$ , тогда как  $\mu_2$  практически сразу начинает увеличиваться с большей скоростью. Рост

трещины начинает сказываться на коэффициенте корреляции и максимальном значении огибающей только после 70% наработки.

На частоте УЗ-контроля  $f=350$  кГц (рисунок 2.11б) момент зарождения трещины выявляется акустическим методом с большей чувствительностью, и все информативные параметры меняют характер изменения практически сразу после появления усталостной трещины. Однако, изменение характера распространения волны Лэмба в образце приводит к тому, что значения параметров NCC и MaxEnv ближе к моменту разрушения начинают возрастать.

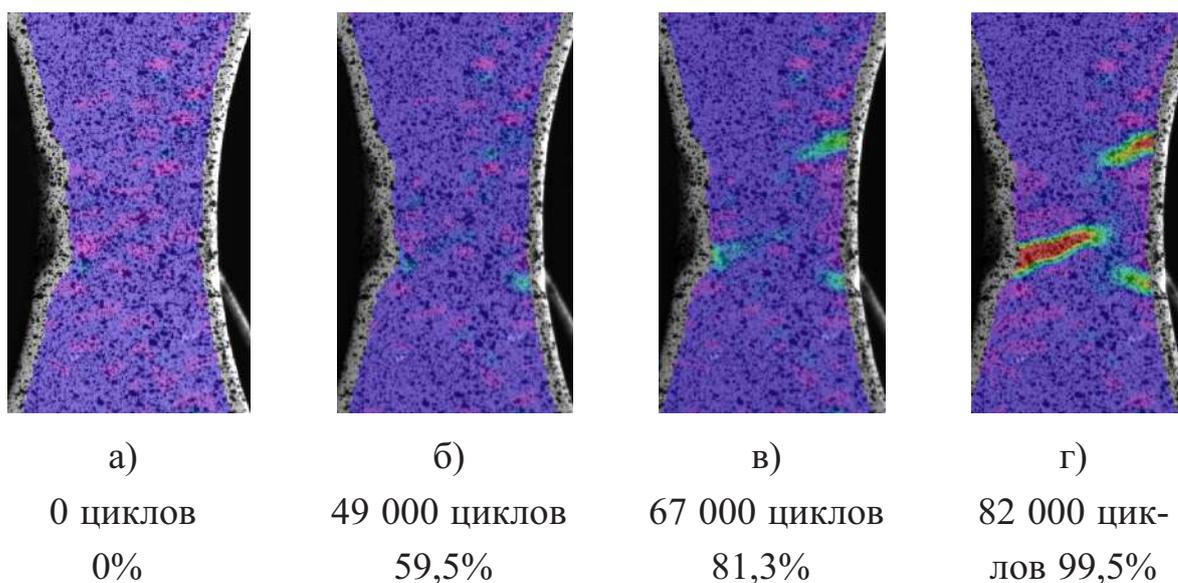


Рисунок 2.12 — Образец со сварным швом. Поля деформаций  $\varepsilon_1$ , полученных методом корреляции цифровых изображений при различной величине циклической наработки.

На рисунке 2.12 показаны картины полей деформаций  $\varepsilon_1$  для образца со сварным швом, испытанным на циклическое растяжение. Механические характеристики материала сварного шва, существенно ниже, чем основного сплава, что ведет к существенному снижению пластичности и повышенной концентрации напряжений в области сварного соединения. По данным оптического мониторинга усталостная трещина зарождается при величине наработки примерно  $N=49\,000$ – $52\,000$  циклов (59–63%) и достаточно долго растет в процессе циклического нагружения. При этом скорость ее роста резко возрастает после достижения  $N=74\,000$  циклов (89%). Кроме того, по полям деформаций  $\varepsilon_1$  видно, что изначально зарождается одна трещина, затем еще две и в дальнейшем происходит одновременный рост трех усталостных трещин. В итоге одна из них становится магистральной — по ней проходит разрушение.

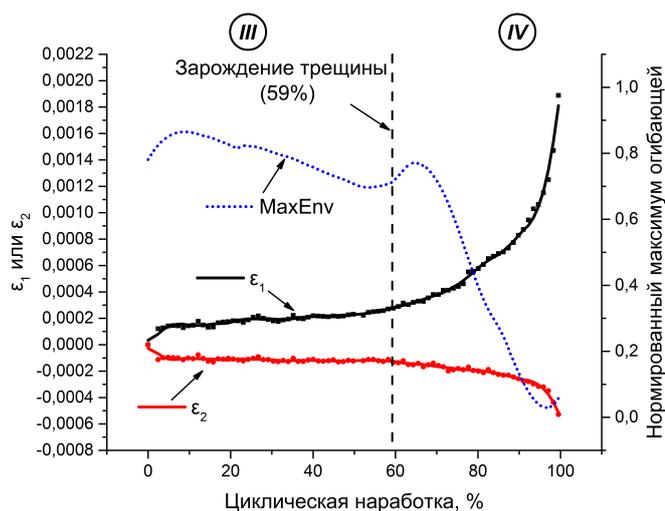


Рисунок 2.13 — Результаты оптического контроля образца со сварным швом. Графики изменения деформации  $\varepsilon_1$  в зависимости от величины циклической наработки, совмещенные с графиком MaxEnv.

При испытании образцов со сварным соединением комбинированный оптико-акустический мониторинг выявляет две стадии (против 4-х для образца без шва). Стадии I и II отсутствуют, а процессы разрушения начинаются сразу со стадии III — локализация развития повреждений в небольшой области, т. к. сварной шов является высоко дефектной структурой, в которой происходит концентрация напряжений. Затем следует стадия IV — роста макротрещины, которая сопровождается появлением еще двух трещин и приводит к возрастанию значений параметров MaxEnv и NCC после 80% наработки.

Таким образом, путем проведения тестового испытания образцов алюминиевого сплава В96ц3Т12 в исходном виде и со сварными соединениями, показано, что предлагаемый метод анализа информативных параметров (по данным акустического и оптического мониторинга) с выявлением характерных стадий позволяет достоверно давать оценку степени поврежденности материала. Таким образом, они могут быть эффективно использованы для проведения мониторинга состояния конструкционных материалов при циклическом нагружении.

### 2.2.3 Обсуждение результатов тестирования

На основании данных ультразвукового мониторинга, можно определить момент зарождения усталостной трещины, при этом контроль волнами Лэмба на более высокой частоте ( $f=350$  кГц) в виду меньшей длины волны позволяет

сделать это раньше и с большей чувствительностью, что подтверждается результатами, полученными для обоих типов образцов. Для образца без сварного шва интервал наработки, в котором трещина зарождается и растет, в силу невысоких значений трещиностойкости сплава В96ц3Т12 и максимальной нагрузки в цикле равной  $0,6\sigma_b$ , является достаточно узким. Несмотря на это, информативные параметры на данной стадии демонстрируют достаточно выраженные изменения: так амплитуда сигнала резко падает, а форма изменяется, приводя к росту дисперсии ( $\mu_2$ ) и падению коэффициента корреляции (NCC); при этом на высокой частоте обозначенные изменения более выражены (рисунок 2.8б).

Для образца со сварным швом, испытанным на циклическое растяжение, диапазон наработки, при котором происходит распространение усталостной трещины, существенно выше. Это связано с совместным воздействием двух факторов — более низким уровнем нагрузки при испытании и более ранним зарождением трещины от уже имеющихся дефектов сварного соединения, которые при более низких напряжениях распространялись с меньшей скоростью. Кроме того, с помощью метода корреляции цифровых изображений было выявлено, что формирование трещин в образце происходит у края образца одновременно в трех областях и растут вплоть до разрушения (рисунок 2.12).

Анализ результатов ультразвукового мониторинга образцов со сварным соединением позволяет заключить, что изменения состояния образца хорошо определяются с помощью волн Лэмба. При этом использование только более высокой частота зондирования ( $f=350$  кГц) позволяет выявлять момент зарождения трещины (что согласуется с данными проведения мониторинга оптическим методом). В частности, параметр  $\text{MaxEnv}$ , имеющий до зарождения трещины постоянное значение, начинает быстро уменьшаться, в то время как скорость изменения параметров, Дисперсия и NCC увеличиваются (рисунок 2.11). Проведение ультразвукового контроля на более низкой частоте  $f=60$  кГц является менее эффективным, вследствие меньшей чувствительности. В то же время, с его помощью удастся зафиксировать наличие растущего дефекта при величине наработки на 10% позднее, нежели при его детектировании методом DIC.

Стоит также отметить, что в данном испытании были использованы достаточно высокие значения циклических нагрузок (особенно для исходных образцов без шва), которые приводят к разрушению в пределах значений мало- и среднециклового усталости. Если испытание реализовать при более низких напряжениях, что будет соответствовать базе  $N=10^6$  циклов нагружения, то можно

ожидать более плавного изменения всех используемых параметров сигнала в процессе распространения усталостной трещины и добиться ещё более надежных результатов оценки состояния материала.

Таким образом, показано, что путем анализа информативных параметров при комбинированном оптико-акустическом мониторинге удастся достоверно выявить стадийность накопления повреждений, а также момент зарождения трещины: стадии I и II — формирование микроповреждений в объеме материала; стадия III — рост и слияние микротрещин; стадия IV — зарождение и рост магистральной трещины. При этом оптический контроль малочувствителен к начальным этапам разрушения на первых стадиях.

Волны Лэмба с одной стороны имеют очень низкое затухание и способны перемещаться на большие расстояния, а с другой — они характеризуются сложным механизмом распространения (дисперсия, наличие одновременно разных типов мод и др.), что, безусловно, усложняет анализ сигналов при разработке систем контроля. В общем случае, ультразвуковая волна является чувствительной к различным деформационным процессам, но судить о том или ином напряженно-деформированном состоянии нагруженного материала или величине испытываемых напряжений, анализируя информативные параметры, при использовании описываемого подхода очень сложно. Данные выводы также опубликованы в работах [108; 111].

#### 2.2.4 Заключение по разделу 2.2

В разделе 2.2 проведено тестирование разработанного ИМК, использующего два метода мониторинга механического состояния образца (акустический и оптический), на примере образцов высокопрочного алюминиевого сплава со сварными соединениями. По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

1. Ультразвуковой метод мониторинга, основанный на волнах Лэмба, позволяет выявлять развитие процессов деформации и разрушения. Однако, при использовании акустического контроля не удастся достоверно идентифицировать процессы, происходящие при выявленных изменениях значений информативных параметров. В частности, информативные параметры для разных частот зондирования ( $f=60$  и  $f=350$  кГц), меняются различным образом, что связано с различием чувствительности к процессам накопления повреждения и разрушения акустических волн разной длины.

2. Для образца без сварного шва зарождение и распространение трещины происходит в течение короткого промежутка времени (примерно  $N=5000$  циклов или 5% от общей наработки). На этапе до появления трещины поведение параметров  $\text{MaxEnv}$  и  $\text{NCC}$  величинах наработки равных 20% и 60% связано с нелокализованным формированием микроповреждений, которые изменяют характер распространения акустических колебаний, но не отражаются на полях деформаций (оптический метод). В то же время, появление трещины отчетливо регистрируется предлагаемым комбинированным оптико-акустическим методом.

3. Для образца со сварным швом при циклических испытаниях зарождение усталостной трещины происходит существенно раньше, чем для исходного образца. Изменения состояния и появление повреждений достоверно регистрируются с помощью ультразвуковой методики: происходит существенное увеличение скорости изменения информативных параметров после момента зарождения трещины, тогда как до этого момента характер изменения информативных параметров имеет стабильный монотонный тренд.

### 2.3 Заключение по главе 2

В главе 2 разработана структурная схема и алгоритм функционирования испытательно-мониторингового комплекса для оценки состояния материала в процессе циклического нагружения при помощи комбинированного оптико-акустического метода. Данный комплекс был реализован на базе сервогидравлической испытательной машины BISS UTM 150, оснащенной контроллером SS2370. Оптический мониторинг реализован на основе метода корреляции цифровых изображений с визуализацией полей деформаций. Для акустического мониторинга использованы ультразвуковые волны Лэмба, генерируемые и регистрируемые парой пьезоэлектрических преобразователей. Для разработанного комплекса предложена методика наклейки УЗ-датчиков и методика определения параметров проведения акустического контроля (частоты зондирующих сигналов). Кроме того, выбраны информативные параметры, а также предложена методика их расчета для оценки состояния и степени поврежденности материала.

Разработанный комплекс и предлагаемые методики оценки состояния на основе комбинированного оптико-акустического метода были протестированы при циклических испытаниях образцов высокопрочного алюминиевого сплава

В96ц3Т12 в исходном состоянии (без сварного шва) и со сварным соединением, выполненным аргонодуговой сваркой.

Комбинированное использование двух методов мониторинга (оптического и акустического) позволяет добиться большей точности при оценке состояния материала и процессов его поведения под воздействием переменных нагрузок. Оба метода являются чувствительными к моменту зарождения трещины в материале, а также к изменению его механического состояния в процессе испытания. Использование оптического метода позволяет выявлять локализации деформаций в зоне зарождения трещины, однако, малочувствителен к начальным этапам усталостного разрушения. Акустический контроль способен обнаруживать как появление трещины в материале, о чем свидетельствует резкое снижение информативных параметров  $\text{MaxEnv}$  и  $\text{NCC}$  и возрастание  $\mu_2$  на обеих использованных частотах зондирования, так и развитие процессов разрушения на микро- и мезоуровне на начальных этапах нагружения.

Стоит отдельно отметить, что акустический контроль образцов малого размера усложняется наличием большого числа отражений от границ образца, которые накладываются на первый волновой пакет, проходящий напрямую от излучателя к приемнику. Как следствие возникает интерференция волн и определенный интерференционный паттерн, который, с одной стороны, очень чувствителен к локальным изменениям в материале (чувствительность к дефектам, существенно меньшим, чем длина волны), а с другой — затрудняет интегральную интерпретацию получаемых результатов и выделение отдельных волновых пакетов и колебательных мод.

### **Глава 3. Лабораторный исследовательско-диагностический комплекс (ЛИДК) на основе метода корреляции цифровых изображений для оценки усталостного разрушения металлических материалов**

#### **3.1 Введение к Главе 3**

Процесс эксплуатации металлических конструкционных материалов неразрывно связан с проблемами их усталостного разрушения под действием циклических нагрузок. В этом случае в материале зарождается и растет усталостная трещина (трещины), что требует особого контроля и понимания процессов её распространения. Особенно этот вопрос актуален в авиастроении, где требования безопасности очень высоки.

Несмотря на более чем столетнюю историю этого научного направления, многие аспекты усталостного разрушения материалов до сих пор остаются не до конца изученными, а с появлением новых материалов, неизбежно встает вопрос необходимости проведения исследований особенностей их поведения при циклическом нагружении. В частности, последние годы научное сообщество концентрирует свое внимание на процессах, происходящих впереди вершины трещины на микроуровне, а именно формирование пластических монотонной и циклической зон и их эволюция в процессе распространения трещины, особенно в случаях неоднородного нагружения.

Одной из самых распространенных методик изучения усталостного разрушения является анализ изображений поверхностей изломов (фрактографический анализ) при помощи оптического и растрового электронного микроскопа. Однако этот метод имеет ряд существенных недостатков, прежде всего, получение результатов только на уже разрушенном образце и, как следствие, невозможность мониторинга эволюции трещины и количественной оценки параметров ее роста во время циклического нагружения, а также необходимость в наличии дорогостоящего оборудования, в частности растрового электронного микроскопа, и высококвалифицированного оператора. При этом данный метод не позволяет напрямую количественно измерять многие параметры, используемые в механике разрушения.

Еще одним хорошо известным способом исследования процессов роста трещины является применение датчика раскрытия (в англоязычной литературе — crack opening displacement, COD), который также не лишен ряда недостатков. Например, разрешающая способность COD-датчика не позволяет получить оценку

изменений, происходящих в материале при неоднородном нагружении, и для решения подобных задач данный подход не эффективен.

Перспективным способом преодоления описанных ограничений является применение метода корреляции цифровых изображений, который способен измерять механический отклик материала, в том числе впереди вершины трещины, при приложении, как единичных циклов перегрузки, так и при случайном спектре нагружения. Однако для успешного применения данного метода необходима дальнейшая разработка аппаратно-программных средств с целью а) повышения точности и стабильности получаемых результатов (количественных оценок); б) разработки методик подготовки поверхности и регистрации изображений поверхности для дальнейшего расчета полей деформаций; в) разработки методов расчета параметров, используемых в механике разрушения, на основе построения полей деформаций для проведения последующей оценки состояния материала и прогнозирования остаточного ресурса.

Данная глава посвящена: во-первых, разработке подхода для управлению ростом трещины путем приложения периодических циклов перегрузки и разгрузки и ее верификация с использованием РЭМ-фратографического анализа; во-вторых, разработке автоматизированного лабораторного исследовательско-диагностического комплекса, использующего метод корреляции цифровых изображений для оценки параметров роста трещины (в терминах механики разрушения), а также оценки состояния материала на основе рассчитанных параметров с возможностью реализации разработанной методики управления ростом трещины.

### **3.2 Разработка методики управления процессом роста усталостной трещины на основе теоретических расчетов и экспериментальной верификацией с помощью растровой электронной микроскопии**

#### **3.2.1 Теоретические основы проведения усталостных испытаний на основе методики испытания с применением циклов перегрузки-разгрузки**

Поскольку в рамках данной работы использование метода корреляции цифровых изображений ставит своей основной целью мониторинг отклика материала на прикладываемые нагрузки в области вершины трещины с дальнейшим расчетом параметров механики разрушения, то для успешной разработки комплекса и метода оценки необходимо провести детальное экспериментальное

исследование процесса классическими экспериментальными методами. Задача данного раздела: на основе аналитических расчетов, литературных данных и экспериментальной верификации с помощью фрактографического анализа разработать метод управления процессом роста усталостной трещины на использовании циклов перегрузок-разгрузок.

Эффект взаимодействия циклов различной амплитуды и асимметрии в моделях усталостного разрушения в первую очередь основан на явлении закрытия трещины, а также остаточных напряжениях в окрестности вершины трещины. Кроме того, существующие модели учитывают в большей степени монотонную пластическую зону и расположение вершины трещины относительно этой зоны, но не принимают во внимание циклическую пластическую зону. Тогда как именно циклическая пластическая зона является важным объектом, требующим более пристального изучения.

Трещина, являясь концентратором напряжений (а в представлении линейной механики разрушения напряжения в вершине стремятся к бесконечности), даже при относительно низких прикладываемых нагрузках приводит к появлению пластических деформаций вблизи вершины. При этом на этапах нагружения и разгрузки отклик материала демонстрирует нелинейный характер, проявляющийся в эффекте механического гистерезиса. При этом для проявления данного эффекта, а также для наблюдения за поведением материала при отклике на прикладываемую нагрузку, нет необходимости в прорастании трещины, т.е. это процесс, который является чувствительным не к распространению трещины, а к последовательности прикладываемых нагрузок. Однако для изменения характеристик (прежде всего, размера) монотонной пластической зоны после приложения перегрузки необходимым условием является именно прорастание трещины. Таким образом, даже имея не растущую трещину и прикладывая к материалу различные по уровню нагрузки, можно наблюдать изменения в его отклике именно в области циклической пластической зоны, размер которой очень мал, как минимум в 4 раза меньше монотонной пластической зоны и зачастую протяженность которой составляет десятки микрометров.

В случае не распространяющейся трещины в отсутствие эффекта закрытия диаграмма «напряжение-деформация» представляет собой петлю гистерезиса, где  $\sigma^*$  обозначает напряжения около вершины трещины (внутри циклической пластической зоны). Рисунок 3.1 иллюстрирует отклик материала на различные последовательности прикладываемой нагрузки: по схеме А, когда разгрузка

предшествует перегрузке и по схеме Б, когда за перегрузкой следует разгрузка. Локальные напряжения  $\sigma^*$  моделируются и вычисляются с использованием уравнений и процедур, описанных в работе [112].

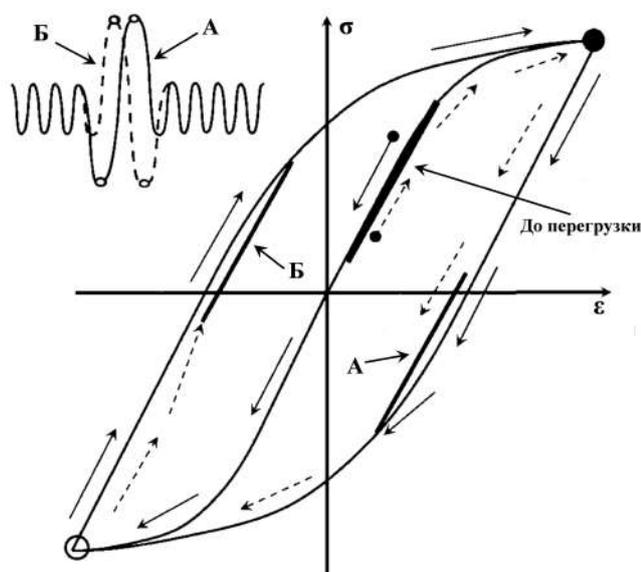


Рисунок 3.1 — Изменение местных напряжений вблизи вершины трещины при базовом уровне циклических нагрузок, совмещенном с циклом перегрузки-разгрузки по двум возможным схемам А и Б.

Принято допущение, что закрытие трещины отсутствует. Направления траектории нагружения обозначены сплошными стрелками для случая А и стрелками для случая Б.

Как видно из представленной диаграммы (рисунок 3.1) базовый уровень напряжений после приложения нагрузки по схеме А падает более существенно, чем после приложения перегрузки-разгрузки по схеме Б. Более сильное падение напряжений при базовом уровне прикладываемых нагрузок в случае А связано с упругой разгрузкой из верхней точки, что приводит к возникновению преимущественно сжимающих напряжений при дальнейшем циклировании на базовом уровне прикладываемой нагрузки. В случае Б, ситуация обратная, в финальной стадии процесса происходит нагружение из нижней точки до некоторого среднего уровня, не достигающего изначального, имевшего место до приложения перегрузки.

Снижение среднего уровня напряжений в вершине трещины является следствием сформировавшихся там остаточных напряжений, которые в свою очередь возникают по причине нелинейного (в виде петли гистерезиса) отклика материала на прикладываемые последовательности нагрузок. Остаточные

напряжения определяют пороговый размах коэффициента интенсивности напряжений для нескольких следующих циклов нагрузки, и являются зависимыми от последовательности прикладываемых нагрузок. Однако изменение остаточных напряжений не требует подрастания трещины. При этом обязательным условием для реализации закрытия трещины является её прорастание в монотонную пластическую зону, сформированную при перегрузке. Размер этой зоны определяет верхний уровень закрытия трещины.

Основываясь на представлениях в области механики усталостного разрушения, а также моделях О. Уиллера [19], Дж. Уиленборга [113], В. Эльбера [114] и Р. Сундер [115] были получены кривые изменения ключевых параметров — КИН открытия трещины ( $K_{op}$ ), порогового размаха КИН ( $\Delta K_{th}$ ), а также скорости роста трещины ( $da/dN$ ), — являющихся чувствительными к последовательности прикладываемых нагрузок. Данные зависимости продемонстрированы на рисунке 3.2, где горизонтальная ось изображает процентное удлинение трещины внутри монотонной пластической зоны, вызванной перегрузкой.

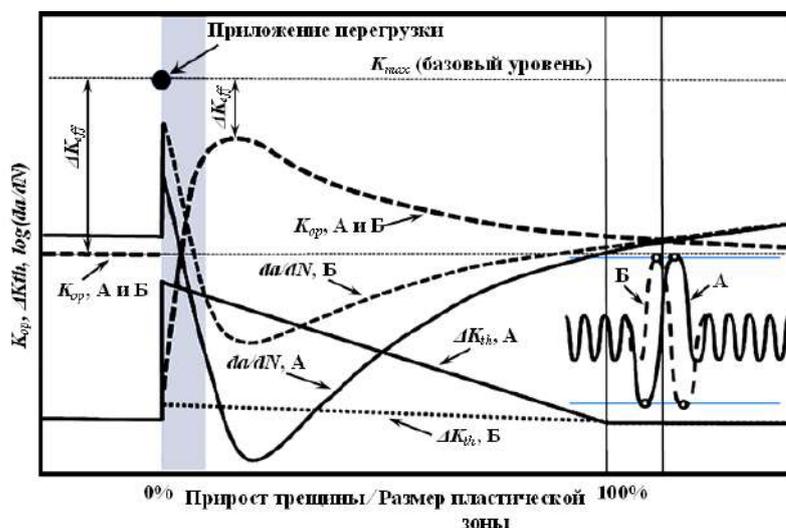


Рисунок 3.2 — Схема интерпретации эффекта перегрузки и изменения ключевых параметров.

Как известно,  $K_{op}$  резко снижается сразу после перегрузки в связи с притуплением вершины трещины. Это приводит к увеличению эффективного размаха  $\Delta K_{eff}$ , а также скорости роста трещины. Таким образом, трещина начинает прорастать в монотонную пластическую зону, сформированную перегрузкой, и происходит процесс заострения ее вершины. При этом, при распространении в пластическую зону, берега трещины испытывают на себе

воздействие сжимающих напряжений, что достаточно быстро приводит к возрастанию уровня закрытия трещины и падению  $\Delta K_{eff}$ . Согласно существующим представлениям величина закрытия определяется максимальных уровнем  $K_{max}$ , а не последовательностью прикладываемых нагрузок, что делает неотличимыми схемы нагружения А и Б, с точки зрения уровня закрытия.

Также существенно зависит от последовательности прикладываемых нагрузок пороговое значение коэффициента интенсивности  $\Delta K_{th}$ . Его значение скачкообразно возрастает сразу после приложения перегрузки и затем линейно снижается до базового уровня напряжений в процессе распространения трещины через пластическую зону. Именно различные значения параметра  $\Delta K_{th}$  для двух последовательностей приложения нагрузок приводит к различным скоростям роста трещины ( $da/dN$ ) при базовом уровне напряжения циклирования.

Корректность построенной теоретической модели проверяется экспериментально, при помощи специальной фрактографической методики и программируемых блоков нагружения. Дальнейшее экспериментальное исследование направлено на определение того как величина закрытия трещины ( $K_{op}$ ) и пороговый размах коэффициента интенсивности ( $\Delta K_{th}$ ) изменяются в процессе неоднородного нагружения, приближенного к реальным спектрам нагружения.

### **3.2.2 Экспериментальное исследование и тестирование методики управления ростом трещины при приложении циклов перегрузки-разгрузки**

В рамках проводимого тестирования были использованы три схемы сложного блочного нагружения, которые представлены на рисунке 3.3. Нагружения по схеме 1 состоит из 4-х блоков: первые два блока содержат цикл разгрузки, после которого идет перегрузка с последующим базовым уровнем циклических нагрузок в течение 2 500 циклов или 10 000 циклов; третий и четвертый блоки повторяют первые два по базовым нагрузкам, однако отличаются последовательностью первоначальных циклов нагрузки-разгрузки — сначала идет перегрузка, а потом разгрузка. Выбранная последовательность позволит наглядно продемонстрировать влияние последовательности прикладываемых нагрузок на скорость роста усталостной трещины при базовом цикле.

Второе испытание (рисунок 3.3) по схеме 2 построено таким образом, чтобы показать и оценить влияние уровня разгрузки перед перегрузкой на последующий рост трещины. В этом случае используется 5 блоков, в каждом из которых начальный уровень разгрузки от блока к блоку снижается, начиная с

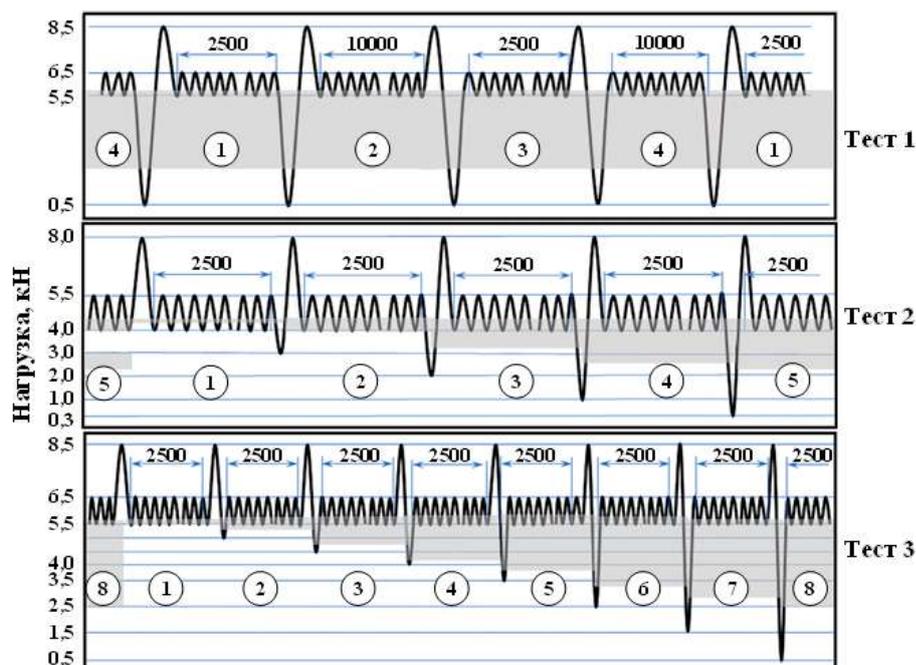


Рисунок 3.3 – Последовательности прикладываемых нагрузок для испытаний (а) по схеме 1, (б) по схеме 2 и (в) по схеме 3. Каждая последовательность программного нагружения повторялась до разрушения образца. Затененная область показывает ожидаемый минимальный (определяемый по максимуму базового цикла и минимуму разгрузки) и максимальный уровень (определяемый по минимуму базового цикла и максимуму перегрузки) закрытия трещины.

базового уровня (4 кН) в 1-ом блоке и заканчивая 0,3 кН в 5-м блоке. Схема 3-го испытания (рисунок 3.3) аналогична второй, но в этом случае снижается уровень цикла разгрузки, который следует за перегрузкой.

Данное сложное многоблочное нагружение прикладывалось к так называемым компактным образцам (compact tension specimens, C(T) specimen), выполненных из алюминиевого сплава AA2024 (зарубежный аналог Д16Т), чертеж которых представлена на рисунке 3.4.

### 3.2.3 Результаты экспериментального исследования

Как и предполагалось, на поверхности излома сформировался полосчатый рельеф, который регистрировался методом растровой электронной микроскопии. Приложенные циклы перегрузки-разгрузки оставляют после себя бороздку, а затем при базовом уровне циклирования на поверхности формируется относительно гладкая поверхность усталостного роста трещины. Имея теоретически

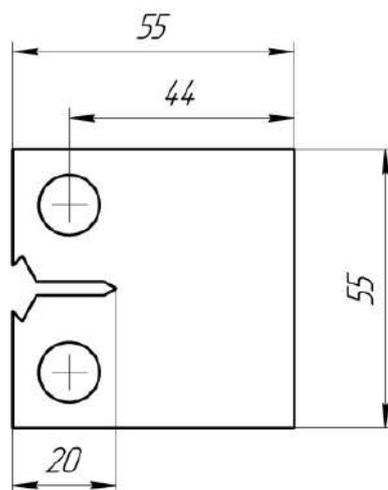


Рисунок 3.4 — Чертеж компактного образца для проведения циклических испытаний с программируемой последовательностью приложения нагрузок по трем схемам.

предсказанное поведение трещины материала при данном типе нагружения, каждому блоку можно сопоставить свою конкретную область на поверхности излома.

Результаты такого анализа для испытания по схеме 1 представлены на рисунке 3.5. Расстояния, на которое проросла трещина за 1 и 2 блок нагружения, равны, несмотря на то, что количество базовых циклов нагружения во 2-ом блоке было в четыре раза больше, чем в 1-ом. Это может быть объяснено следующим образом: цикл перегрузки способствовал формированию сжимающих остаточных напряжений, которые привели к возрастанию  $\Delta K_{th}$ , значение которого не превысило  $\Delta K$ . После приложения перегрузки также произошло притупление вершины трещины и закрытие отсутствовало. Однако при продвижении трещины величина закрытия начинала достаточно быстро возрастать, тем самым приводя к снижению  $\Delta K_{eff}$  до величины ниже  $\Delta K_{th}$ . В этом случае трещина останавливается. Сравнивая расстояние, которое прошла трещины на 1 и 2 блоке, примерно в три раза меньше, чем в 3-м блоке. Таким образом, можно оценить, что трещина остановилась примерно после 800-1000 циклов.

Для блоков 3 и 4, где разгрузка идет после перегрузки, происходит снятие остаточных напряжений сжатия и, как следствие,  $\Delta K_{th}$  возрастает не столь значительно. Для большинства измерений полоса, соответствующая 4-му блоку нагружения, шире полосы 3-го блока меньше, чем в 4 раза. Данный факт свидетельствует о том, что закрытие продолжает возрастать после 2 500 циклов.

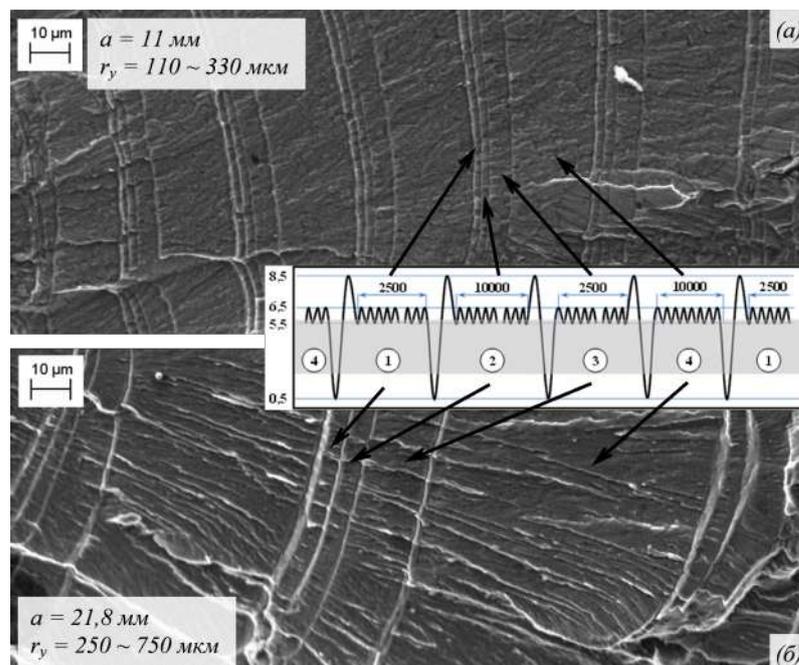


Рисунок 3.5 — РЭМ фрактограммы поверхности излома при нагружении образца по схеме 1 для двух длин трещины ( $a=11$  мм и 21,8 мм). Снимки сделаны в центральной части образца. Размер пластической зоны ( $r_y$ ) представлен для плоского деформированного и плоского напряженного состояния.

Отсюда можно сделать обобщение, что уровень закрытия после прикладываемой перегрузки восстанавливается существенно быстрее, чем предполагалось ранее, и составляет примерно 4-6 мкм для проведенных испытаний. Для более точного заключения необходимо проведение дополнительных исследований с использованием методик, позволяющих измерять закрытие с достаточной точностью и в заданные моменты времени, чего нельзя добиться фрактографическими методами исследования.

Рисунок 3.6 демонстрирует результаты численного моделирования напряжений вблизи вершины трещины под действием циклов разгрузки-перегрузки для блоков 1 и 3. Аналогичное моделирование уже было представлено и детально проанализировано в данной главе ранее. Остаточные напряжения в вершине представляют интерес для определения  $\Delta K_{th}$ . Согласно модельным представлениям величина цикла разгрузки, предшествующего перегрузке, не оказывает влияние на получаемые в итоге значения порогового размаха  $\Delta K_{th}$  и, следовательно, ширина полос на изломе должна быть одинаковой для всех блоков, что и наблюдается в экспериментальных результатах, представленных на рисунке 3.7.

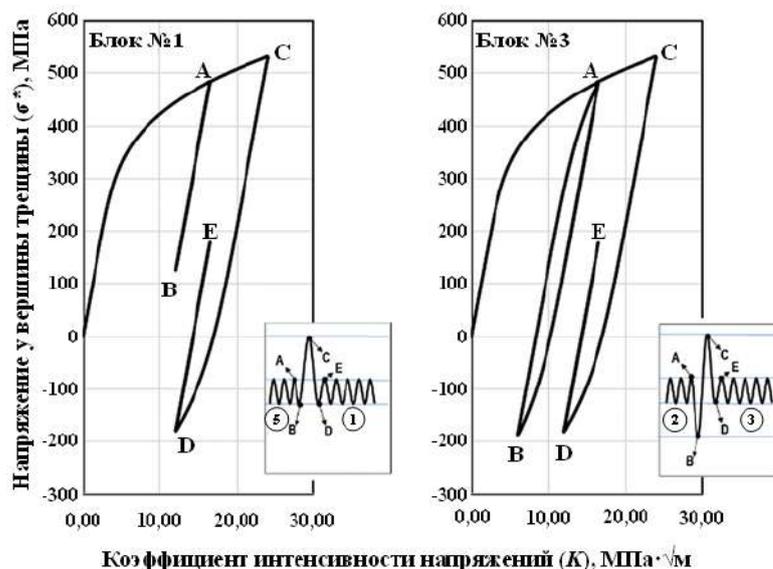


Рисунок 3.6 — Результаты численного моделирования напряжений вблизи вершины трещины при перегрузке для блоков 1 и 3 испытания по схеме 2.

Напряжения, возникающие в базовом цикле после перегрузки показаны точкой D. Эти напряжения не подвержены влиянию разгрузки, приложенной перед перегрузкой.

Основное промежуточное заключение, которое можно сделать по итогам представленных результатов, состоит в том, что циклы разгрузки, прикладываемые перед перегрузкой, не оказывают влияние ни на величину закрытия трещины, ни на остаточные напряжения в вершине трещины. Явление притупление трещины, вызываемое перегрузкой, снижает уровень закрытия, который быстро восстанавливается за счет заострения трещины и при этом оно не зависит от разгрузок, прикладываемых перед перегрузкой.

Для испытания по схеме 3 было также проведено численное моделирование возникающих остаточных напряжений в различных блоках и продемонстрированы на рисунке 3.8 для блока 1 и 5. Величина остаточных напряжений в точке D определяет величину  $\Delta K_{th}$  для последующих базовых циклов. Как видно из представленных результатов, величина остаточных напряжений существенным образом зависит от уровня напряжений в цикле разгрузки, приложенной после перегрузки. Кроме того, на величины остаточных напряжений оказывает влияние еще и уровень КИН, т.е. с ростом длины трещины различие в ширине полос от каждого блока на фрактограмме должно возрасти с увеличением длины трещины.

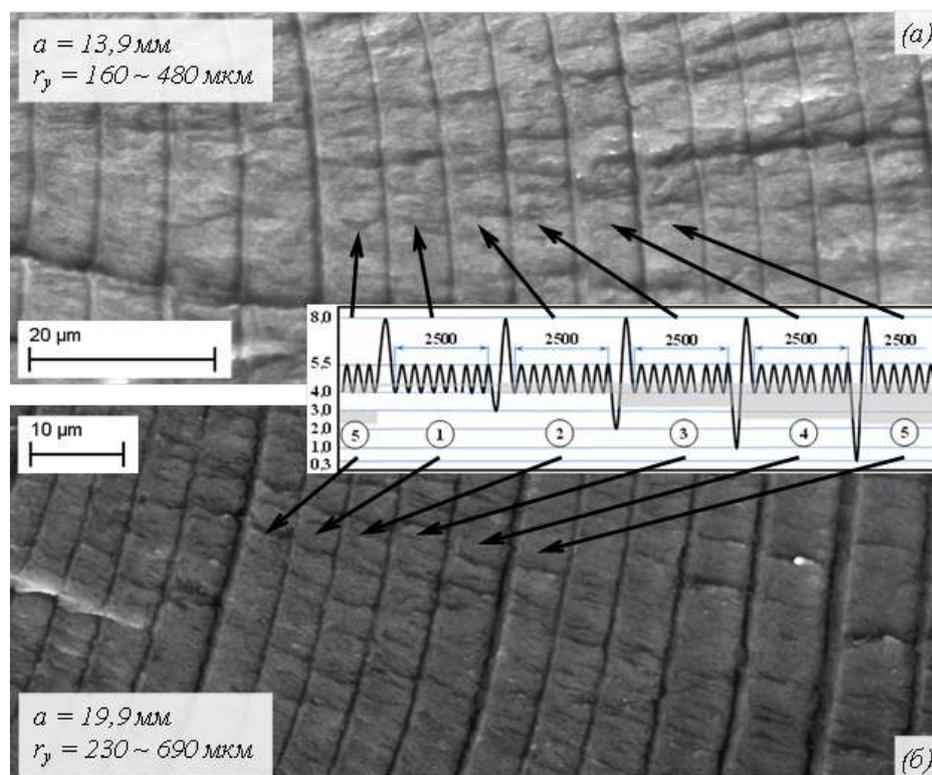


Рисунок 3.7 — РЭМ–фрактограммы поверхности излома при нагружении образца по схеме 2 для двух длин трещины (13,9 мм и 19,9 мм). Снимки сделаны в центральной части образца. Размер пластической зоны представлен для плоского деформированного и плоского напряженного состояния.

Результаты моделирования полностью согласуются с экспериментальными результатами, представленными на рисунке 3.9. Примерно одинаковая ширина полос у первых двух блоков при малой длине трещины (рисунок 3.9а) объясняется низким уровнем разгрузки, что не привело к возникновению лишь упругих сжимающих напряжений в вершине трещины и не «сняло» остаточные напряжения. В связи с этим, трещина остановилась. Увеличивая уровень разгрузки на последующих блоках, ширина полос возрастает, пока не достигает уровня «насыщения» на пятом блоке. Одинаковая скорость роста трещины в этом случае может быть в равной степени связана как с напряжениями вблизи вершины трещины, достигающими максимальных растягивающих значений (в этом случае  $\Delta K_{th}$  минимально), так и с закрытием трещины на том основании, что разгрузка ниже точки закрытия трещины вряд ли приведет к более существенному изменению уровня закрытия при базовом цикле ввиду его быстрого восстановления.

При средней длине трещины (рисунок 3.9б) скорость роста последней на блоке 2 становится немного выше, чем на блоке 1, указывая на негативное влияние разгрузки. Более наглядной это различие становится на трещине большей

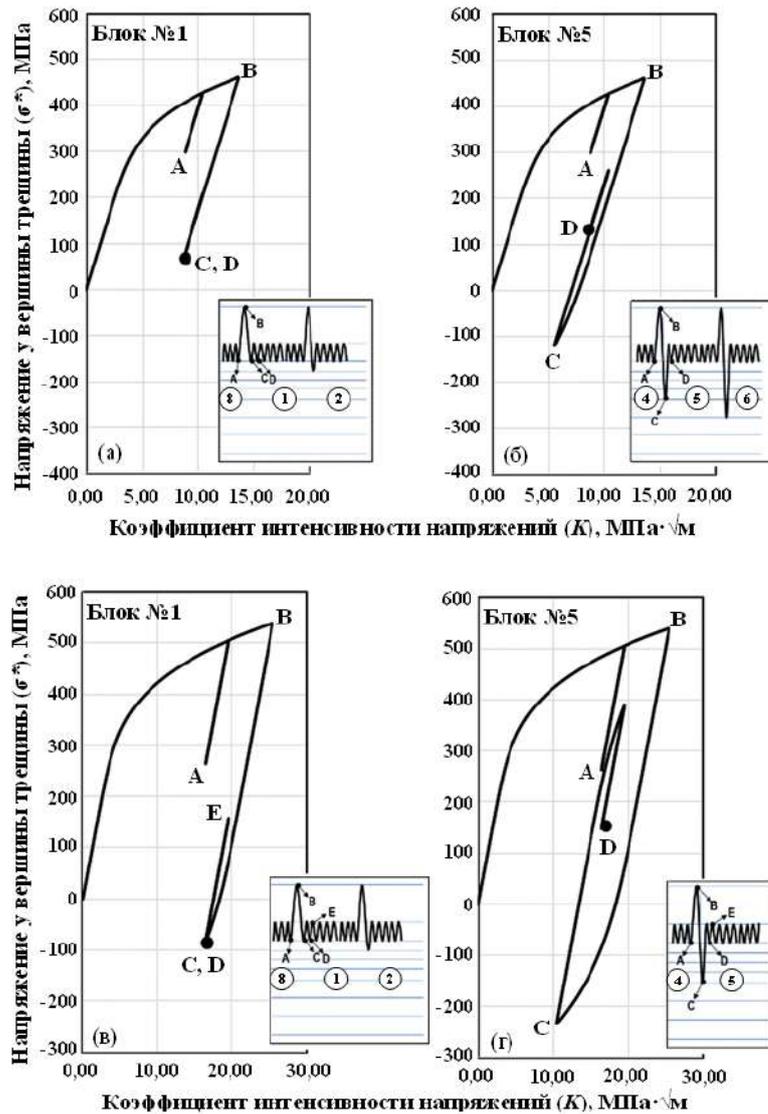


Рисунок 3.8 — Результаты численного моделирования напряжений вблизи вершины трещины при перегрузке для блоков 1 и 5 испытания по схеме 3. Изображения (а) и (б) представлены для короткой трещины, а (в) и (г) для длинной. Ускорение роста трещины при приложении разгрузки после перегрузки объясняется зависимостью  $\Delta K_{th}$  от остаточных напряжений вблизи вершины трещины.

длины (рисунок 3.9в). В этом случае на каждом последующем блоке скорость роста трещины возрастает еще более существенно, чем при малой и средней ее длине, и достигает максимума уже на четвертом блоке. Это объясняется действием существенных по уровню сжимающих напряжений вблизи вершины трещины при цикле разгрузки и, как следствие, восстановлению уровня  $\Delta K_{th}$  до значений в отсутствии перегрузки (рисунок 3.8г).

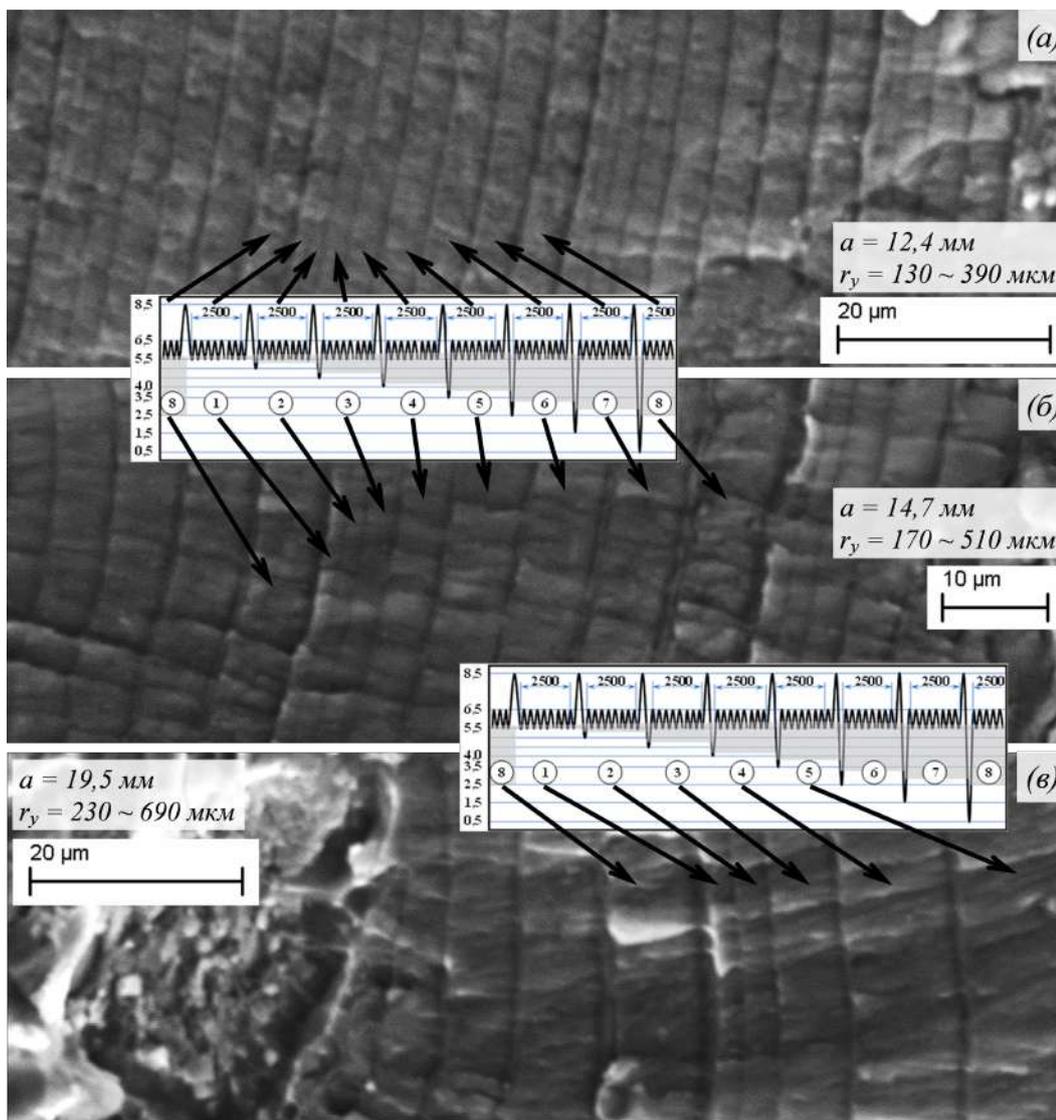


Рисунок 3.9 — РЭМ фрактограммы поверхности излома при нагружении образца по схеме 3 для трех длин трещины (12,35, 14,65 и 19,9 мм). Снимки сделаны в центральной части образца. Размер пластической зоны представлен для плоского деформированного и плоского напряженного состояния. В левой части изображения (в) виден квазистатический излом, вызванный высоким уровнем  $K$ .

### 3.2.4 Обсуждение результатов и постановка задачи на разработку лабораторного исследовательско-диагностического комплекса (ЛИДК) для исследования процессов роста усталостных трещин

На основании полученных экспериментальных результатов и подобной по постановке работе, выполненной Ч. Бихлером и Р. Пиппином [116], можно говорить о том, что моделирование процесса закрытия трещины должно включать в

себя анализ переходного процесса, связанного с притуплением вершины трещины и ее последующим заострением. Их изменения за каждый цикл нагружения связано с радиусом трещины при полувцикле разгрузки и величиной  $\Delta K$  в последующем цикле. Следовательно, даже при высоком значении  $K_{max}$ , которое обычно связано с притуплением трещины, рост усталостной трещины при большой асимметрии цикла и низкой амплитуде должен приводить к заострению трещины. Такой процесс, в свою очередь, стимулирует больший контакт берегов трещины и, как следствие, возрастание уровня закрытия трещины. При этом, он должен быть выше того уровня, который возник бы при том же  $K_{max}$ , но при меньшей асимметрии цикла. Таким образом, закрытие трещины оказывается чувствительно как к  $K_{max}$ , так и  $K_{min}$ . Очевидно, что в эффект притупления трещины вносят вклад: продвижение трещины в монотонную пластическую зону, вызванную перегрузкой и величина  $\Delta K_{eff}$ .

В экспериментах с перегрузкой было показано, что уровень закрытия сначала снижается, так как вершина трещины притупляется, а потом очень быстро восстанавливается вследствие заострения трещины при её продвижении в пластическую зону. Расстояние, которое необходимо преодолеть трещине, чтобы восстановить закрытие, и, чтобы  $\Delta K_{eff}$  стало меньше  $\Delta K_{th}$  (в этом случае рост трещины прекращается), составляет порядка 4 мкм для испытаний по схеме 1 и для схемы 3 блок 1. Для испытания по схеме 2, где уровень базового цикла был на 50% выше, чем в 1-м и 3-м испытаниях, трещины прорастала 8 мкм до остановки. Пересчитав это расстояние в % от размеров пластической зоны, вызванной перегрузкой, получается размер всего в несколько процентов. Для выявления раздельного влияния каждого из этих параметров необходимо проведение дополнительных исследований, включающих количественные оценки взаимосвязи между притуплением/заострением вершины трещины, уровнем закрытия и остаточными напряжениями в близи вершины.

Основываясь на полученных результатах можно говорить о возможности управления скоростью роста трещины путем приложения циклов перегрузки-разгрузки, что ведет к формированию различного поля напряжений впереди вершины, с помощью которого распространение трещины можно как ускорить, так и замедлить относительно ее базового роста. Точность управления скоростью распространения трещины определяется в первую очередь точностью и корректностью используемых расчетных моделей, которые на данный момент

не являются совершенными, поэтому их дальнейшее уточнение и разработка является актуальной задачей.

Процесс усталостного разрушения является сложным для прогнозирования и математического описания, в первую очередь, потому что он зависит от множества факторов: размах цикла, его асимметрия, параметры материала, последовательность прикладываемых нагрузок и другие. Традиционные способы анализа усталости материалов базируются на циклических испытаниях образцов с постоянной амплитудой, тогда как многие реальные конструкции и их элементы подвержены случайным единичным перегрузкам или произвольным спектрам нагружения, что усложняет использование фрактографических методов оценки. Кроме того, основная сложность при работе со случайными спектрами нагружения заключается в восстановлении динамики роста трещины, что увеличивает интерес научного сообщества к таким методам контроля, которые бы позволяли получать информацию о процессах разрушения на микромасштабном уровне в процессе циклического испытания, а не после разрушения, как это обычно происходит при использовании электронной микроскопии [117].

Фрактографический анализ в этом случае является косвенной измерительной методикой, позволяющей оценивать восстановление уровня закрытия исключительно по расстоянию, на которое распространяется трещина, перед тем, как она остановится. Это должно свидетельствовать, как минимум о восстановлении уровня закрытия. Однако, возрастание  $\Delta K_{th}$  на этом этапе и одновременное падение  $\Delta K_{eff}$  затрудняют точное определение всех параметров процесса. Для решения этого противоречия необходим иной *экспериментальный метод*, позволяющий производить прямые измерения. Многие ведущие мировые научные коллективы видят необходимость привлечения метода корреляции цифровых изображений, для более детального изучения описанных процессов. В частности перспективным подходом для контроля процесса роста трещины, как при циклировании с постоянной амплитудой, так и при использовании псевдослучайных спектров нагружения, является оптическая микроскопия с большой степенью увеличения и последующей обработкой изображений поверхности методом корреляции цифровых изображений для расчёта полей деформаций вблизи вершины трещины. Применение алгоритмов распознавания трещины на оптических изображениях и автоматизированной системы позиционирования оптической системы позволяет следить за ростом трещины, и получать ее количественные оценки в заданные моменты времени в процессе испытания.

### **3.3 Разработка лабораторного исследовательско-диагностического комплекса (ЛИДК) для мониторинга процессов усталостного разрушения и оценки роста усталостных трещин на основе метода корреляции цифровых изображений**

#### **3.3.1 Задачи разрабатываемого комплекса**

Разрабатываемый комплекс предназначен для автоматизированного проведения циклических испытаний (в том числе, при неоднородном нагружении с возможностью реализации разработанной ранее методики управления ростом трещины) и оценки состояния нагруженных металлических материалов на основе расчета параметров роста трещины при помощи метода корреляции цифровых изображений. Таким образом, автоматизированный лабораторный исследовательско-диагностический комплекс должен решать следующие задачи:

1. Управлять процессом циклического нагружения в автоматизированном режиме согласно заданным пользователем параметрам с возможностью реализации сложных последовательностей нагружения;

2. Проводить фотографирование поверхности образцов в режиме макросъемки с заданными параметрами и на различных этапах испытания (с остановкой испытания или непосредственно в процессе приложения нагрузки);

3. При помощи цифровой камеры и системы позиционирования в автоматизированном режиме осуществлять фокусировку камеры и ее перемещение вслед за вершиной распространяющейся трещины;

4. Осуществлять расчет векторных полей и карт деформаций по оптическим изображениям образца с последующей оценкой механического состояния по величинам параметров механики разрушения.

Важной особенностью разрабатываемого комплекса является автоматизация всего процесса регистрации данных при проведении испытаний, так как они могут занимать продолжительное время, особенно в условиях сверхмногоциклового усталости. На данный момент оригинальным решением поставленной задачи является определение местоположение вершины распространяющейся трещины по оптическим изображениям с последующим перемещением оптической системы таким образом, чтобы вершина трещины находилась в центре кадра.

### 3.3.2 Разработка принципиальной схемы ЛИДК

Для решения обозначенных выше задач, была разработана принципиальная схема ЛИДК, представленная на рисунке 3.10. Для успешной реализации поставленных целей разрабатываемый комплекс должен включать в себя как аппаратные средства, так и программные компоненты, которые отображены на схеме.

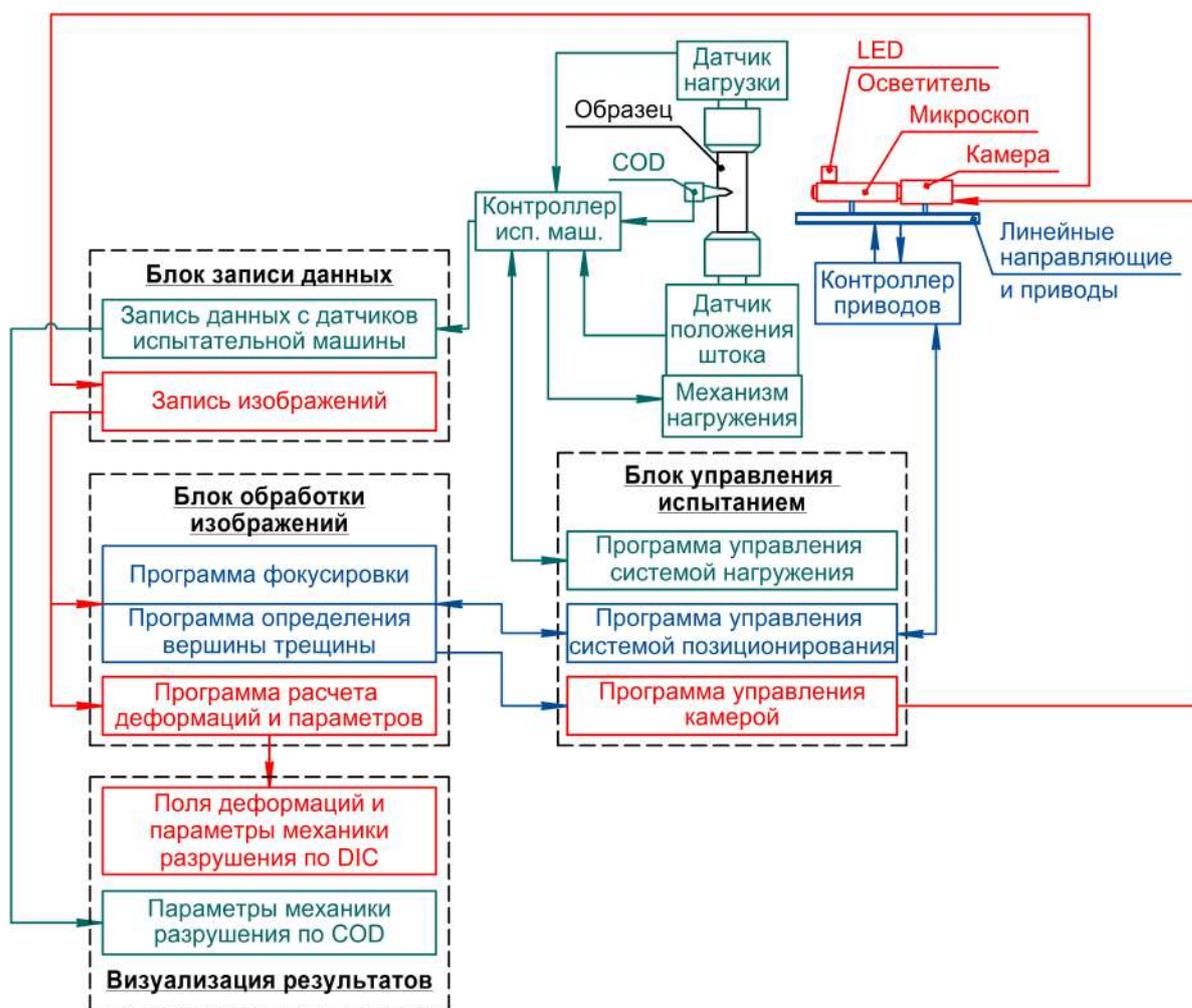


Рисунок 3.10 — Принципиальная схема работы ЛИДК для автоматизированного мониторинга процесса роста усталостной трещины и расчета параметров механики разрушения на основе метода корреляции цифровых изображений.

Цветом на схемы обозначены три функциональные системы, имеющие различное назначение: (1) управление процессом нагружения (зеленый цвет на схеме), (2) проведение оптических измерений деформаций и расчет параметров механики разрушения (красный), (3) автоматизированное позиционирование оптической системы в пространстве (синий).

Аппаратная часть разработанного комплекса состоит из трех функциональных систем.

- *испытательная машина (ИМ)*, в состав которой входят:
  - контроллер ИМ, осуществляющий:
    - \* сбор данных (показаний) с датчиков ИМ;
    - \* считывание данных о параметрах механических испытаний с помощью программы управления системой нагружения и регистрации данных;
    - \* передачу заданных оператором параметров проведения испытаний через программу управления системой нагружения и регистрации данных;
    - \* управление механизмом нагружения на основе полученных данных о параметрах испытания и показаний датчиков;
  - датчик нагрузки — измеряет величину приложенной к образцу нагрузки и передает показания измерений на контроллер;
  - датчик перемещения — определяет координату (положение) подвижного захвата и передает показания измерений на контроллер;
  - механизм нагружения — управляет приводами, осуществляющими перемещение подвижного захвата ИМ.
- *оборудование для проведения оптических измерений*, предназначенное для расчетов полей деформаций на поверхности образца и расчета на их основе параметров процесса роста усталостной трещины, включающее:
  - систему оптического увеличения – микроскопа (Микр.) — позволяет проводить фотографирование в макрорежиме и наблюдать за процессами вблизи вершины трещины на микроуровне;
  - цифровую камеру (ЦК) — служит для регистрации изображений поверхности образца, параметры фотографирования, задаваемые оператором, передаются на ЦК программой управления цифровой камерой;
  - осветитель (Осв.) — служит для равномерного освещения участка поверхности образца, наблюдаемого в микроскоп.
- *оборудование для автоматизированного и ручного позиционирования оптической системы* в пространстве, состоящее из:

- система линейных направляющих и приводов (СЛНиП) — состоит из трех линейных направляющих (двух горизонтальных и одного вертикального), оснащенных шаговыми двигателями, и служащими для перемещения (позиционирования) оптической системы в пространстве;
- контроллер управления приводами (КУП) — предназначен для управления приводами (шаговыми двигателями), а именно передачи им управляющих команд, контроля скорости вращения вала и положения оптической системы в пространстве.

Для автоматизированной согласованной работы всех используемых аппаратных средств было разработано управляющее ПО, а также ПО для проведения расчета параметров механики разрушения. Используемые программы разделены на 4 взаимосвязанных программных блока: (1) управление испытанием, (2) записи данных, (3) обработки изображений и (4) визуализации результатов мониторинга.

#### 1. Программный блок управления испытанием

- а) Программа управления нагружением (Программа УН) — предназначена для задания параметров нагружения, управления испытательной машиной с помощью цифрового контроллера ИМ, а также регистрации показаний с датчиков нагрузки и перемещения. Программа УН позволяет осуществлять полный контроль за реализацией сложных последовательностей нагружения. При функционировании программы осуществляется обмен следующими данными:

- 1) Данные, задаваемые пользователем и передаваемые на контроллер ИМ, включают служебную информацию и параметры нагружения:

- тип режима нагружения («мягкий»/«жесткий»);
- частота нагружения;
- максимальная и минимальная величина нагрузки;
- количество циклов;
- другая служебная информация.

- 2) Данные, регистрируемые программой УН с контроллера:

- показания с датчиков нагрузки и перемещения подвижного захвата, а также величина раскрытия с датчика COD;
- текущее количество циклов нагружения;

- длительность по времени проведения испытания;
  - другая служебная информация;
- б) Программа управления цифровой камерой (Программа УЦК) — предназначена для управления процессом фотографирования поверхности образца.

1) Параметры, задаваемые пользователем (оператором) и передаваемые на камеру, включают:

- режим съемки - одиночный кадр/серия;
- параметры съемки - выдержка, усиления и др.;
- формат файла с изображением;

2) Данные, задаваемые пользователем и передаваемые на Осцл., включают параметры записи акустического сигнала:

- диапазон измеряемых значений по каждому каналу;
- длительность сигнала;

Управляющим воздействием является синхроимпульс для старта фотографирования. Другим управляющим воздействием является сигнал о завершении процесса съемки.

- в) Программа управления системой позиционирования (Программа УСП) — служит для управления автоматизированным и в ручном режиме перемещением оптической системы по трем координатам ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). Перемещение реализуется путем передачи команд контроллеру приводов, который активирует работу шаговых двигателей. Функционирование процесса управления осуществляется путем передачи следующих данных:

1) Данные, задаваемые пользователем и передаваемые на контроллер приводов (значения передаваемых параметров основаны на совместной обработке данных, введенных пользователем и полученных от других программ, например, при определении координат вершины трещины и при фокусировке оптической системы):

- ось перемещения —  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ;
- направление перемещения — прямое / реверсное;
- количество отсчетов для смещения.

2) Управляющие воздействия:

- сигнал об успешном выполнении всех шагов перемещения;
- сигнал о срабатывании концевых выключателей на одном или нескольких линейных направляющих.

2. Программный блок записи данных (Программный блок ЗД):

- а) Подпрограмма записи изображений — предназначена для записи изображений поверхности образцов с фотокамеры в память ПК в заданном пользователем формате.
- б) Подпрограмма записи данных — предназначена для записи в память ПК показаний датчиков испытательной машины (нагрузка, перемещение, раскрытие) и других данных, поступающих с контроллера (тайминги, количество циклов и другая служебная информация).

3. Программный блок обработки изображений (Программный блок ОИ). Данный блок состоит из трех программ, которые используют изображения поверхности образца, записанные в память ПК:

- а) Программа фокусировки – обрабатывает изображения для определения уровня его контрастности, затем передает команду программе управления системой позиционирования для смещения камеры во внеплоскостном направлении. После чего камера повторно снимает изображения и передает их программе фокусировки для расчета. Итерационная процедура позволяет за ограниченное число шагов найти оптимальное положение камеры, дающее максимальный уровень четкости и контрастности регистрируемых изображений.
- б) Программа определения положения вершины трещины – проводит обработку изображений поверхности образца для поиска вершины трещины на основе комбинированного алгоритма. Исходя из результатов обработки изображений, передает найденные параметры смещений на модуль управления системой позиционирования для смещения камеры и последующей реализации процедуры слежения за трещиной.
- в) Программа расчета деформаций и параметров механики разрушения – обрабатывает изображения с применением метода корреляции цифровых изображений, производит расчет полей деформаций и параметров механики разрушения.

4. Программный блок визуализации результатов расчетов (Программный блок ВРР):

- а) Программа визуализации полей деформаций и параметров механики разрушения, рассчитанных с помощью метода DIC:
- программа предназначена для вывода на экран (отрисовки) результатов расчета векторных полей (деформаций) и выбранных параметров векторно-го поля (карты деформаций);
  - производит отображение рассчитанных параметров механики разрушения в виде зависимости от величины наработки.
- б) Программа визуализации параметров механики разрушения, рассчитанных по параметру COD, – предназначена для:
- отображения величины раскрытия, а также результатов расчета параметров механики разрушения по данным датчика раскрытия;
  - визуализации (в виде графиков) изменения выбранных информативных параметров, как функции величины наработки.

### 3.3.3 Разработка алгоритма работы ЛИДК

Алгоритм работы ЛИДК представлен в виде схемы на рисунке 3.11 и состоит из 20 блоков.

На начальном этапе (*Бл. 1*) проводится калибровка системы: определение физического масштаба изображения и калибровка системы позиционирования для корректного смещения камеры, исходя из результатов обработки изображений. После этого пользователем задается последовательность проведения операций при испытании (*Бл. 2*); устанавливаются параметры испытания (нагружения) и фотографирования (*Бл. 3*) и выполняется старт процесса испытания (*Бл. 4*).

После этого ЛИДК работает в автоматизированном режиме и не требует участия пользователя (оператора). После старта испытания запускается программа управления системой нагружения (*Бл. 5*), которая передает заданные пользователем параметры на контроллер испытательной машины (*Бл. 6*). Данная программа управляет процессом циклического нагружения до его остановки после достижения заданного пользователем числа циклов (*Бл. 7*).

Если в процессе нагружения образец не разрушается (*Бл. 8*), то запускается программа управления камерой, которая передает заданные оператором параметры фотографирования на камеру и производит съемку (*Бл. 9*). Полученные изображения используются программой фокусировки (*Бл. 10*) для проведения

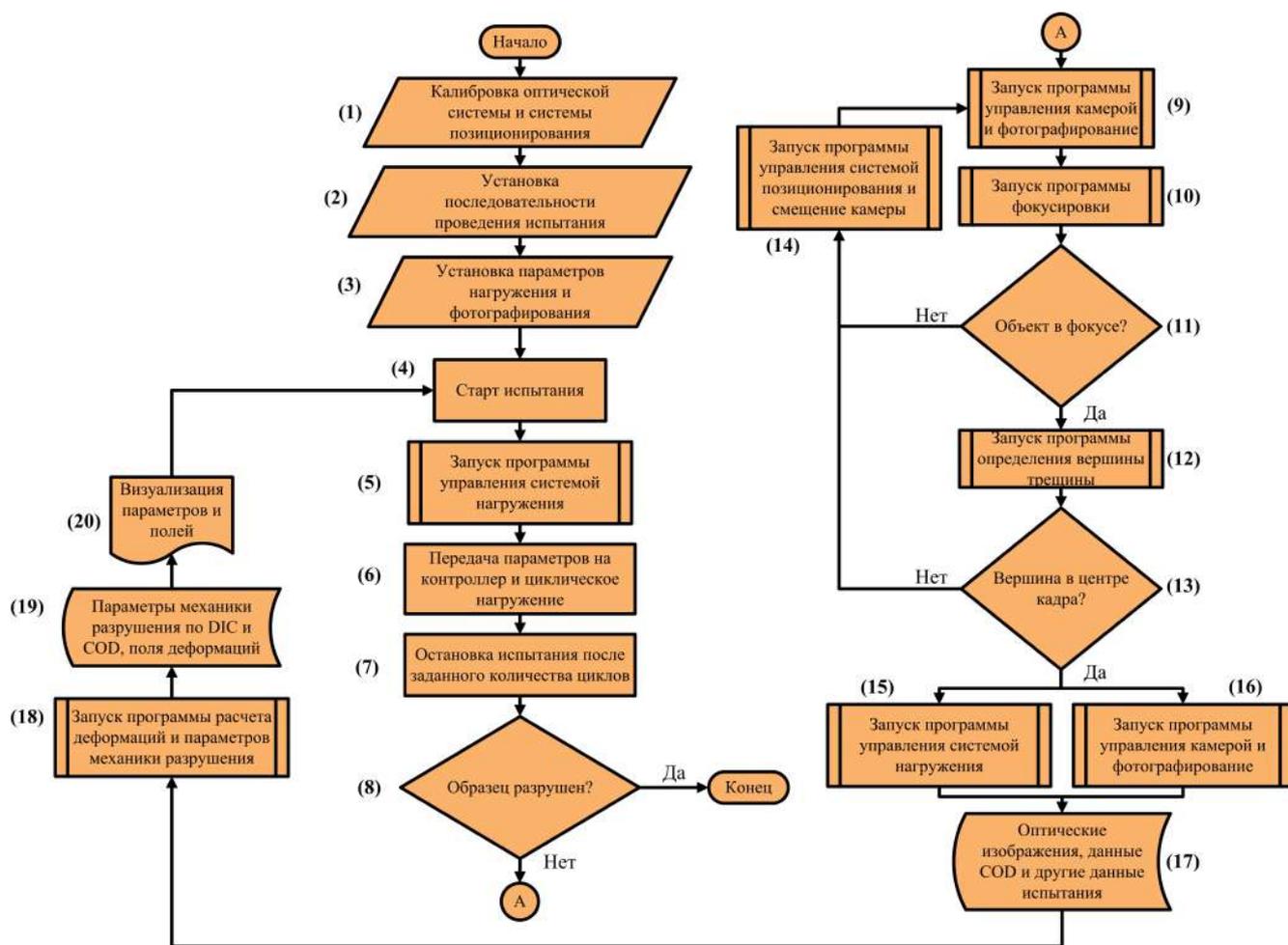


Рисунок 3.11 — Схема алгоритма работы лабораторного исследовательско-диагностического комплекса.

соответствующей процедуры (Бл. 11). Если объект (образец) не в фокусе, то через программу управления системой позиционирования (Бл. 14) подается команда на перемещение камеры; проводится перемещение камеры и процесс фокусировки повторяется заново (Бл. 9–Бл. 11). Процесс фокусировки является итеративным и выполняется за некоторое ограниченное количество шагов.

После того, как фокусировка завершена, происходит определение координат вершины трещины при помощи программы определения вершины трещины (Бл. 12) с проверкой положения вершины в центре кадра с заданной пользователем точностью (Бл. 13). В случае, если вершина находится вне кадра или расположена не по центру, происходит смещение оптической системы (Бл. 14) с целью ее центровки. После смещения камеры необходимо заново проверить качество фокусировки и повторно определить местоположения вершины трещины для проверки правильности перемещения (Бл. 9–Бл. 13).

После завершения позиционирования оптической системы, запускается процесс нагружения (Бл. 15) с одновременной записью изображений (Бл. 16), а также других необходимых экспериментальных данных в память ПК (Бл. 17). Далее происходит запуск программы расчета деформаций и параметров механики разрушения (Бл. 18), как на основе метода DIC, так и по данным датчика раскрытия (COD). Полученные результаты расчетов записываются в файл (Бл. 19) и визуализируются (отрисовываются) на мониторе ПК в виде графических зависимостей (Бл. 20).

Выполнение процесса проводится итеративно, когда точка возобновления соответствует (Бл. 4). При этом действия на (Бл. 18–Бл. 20) могут выполняться параллельно процессу циклического нагружения, выполняемого на (Бл. 5–Бл. 7). Прекращение испытания происходит, если образец разрушен (Бл. 8).

### 3.3.4 Аппаратная реализация ЛИДК

Для реализации на основе предложенной схемы ЛИДК и алгоритма его работы используемые аппаратные средства должны удовлетворять следующим требованиям:

#### 1. Испытательная машина (ИМ):

- предельная реализуемая в испытании нагрузка — не менее 10 кН;
- частота циклического нагружения — 0,01–20 Гц;
- оснащение цифровым контроллером с возможностью подключения к ПК и управлением при помощи ПК.
- возможность оснащения внешним датчиком раскрытия различного типа.

#### 2. Цифровая камера (ЦК):

- размер матрицы — не менее 5 Мп;
- частота фотографирования — не менее 3 кадра/с;
- скорость работы затвора (выдержка) — в диапазоне 1/1000–3 с;;
- формат записи изображений — png, tif или jpg;
- возможность подключения и управление камерой через ПК.
- байонет объектива типа c-mount для совмещения с микроскопом;
- компактность.

#### 3. Микроскоп (Микр.):

- широкий диапазон регулировки увеличения для решения различных задач мониторинга - поле зрения варьируется от 10×10 мм до 0,3×0,3 мм;
- возможность крепления камеры через байонет типа c-mount

- компактные размеры и небольшая масса для закрепления микроскопа на штативе в горизонтальном положении.

#### 4. Осветитель (Освт.):

- формирование равномерного коаксиального освещения;
- минимальное тепловыделение.

#### 5. Линейные направляющие (ЛН):

- Две направляющие для перемещения в горизонтальном направлении на расстояние — не менее 30 мм;
- Одна направляющая для перемещения в вертикальном направлении — на расстояние не менее 15 мм;
- точность позиционирования — не менее 10 мкм;
- возможность присоединения шаговых двигателей;
- компактные размеры и малая масса для размещения на штативе.

#### 6. Шаговые электродвигатели (ШЭ):

- число фаз — 2;
- количество шагов на один оборот — не менее 150;
- возможностью реализации дробного шага — до 1/16.

С учетом выработанных технических требований к аппаратным средствам для создания ЛИДК было использовано следующее оборудование:

1. Испытательная машина BISS Nano 15kN (Biss Ltd., Индия) на базе контроллера SS2370 со встроенными датчиками нагрузки и перемещения нижнего подвижного штока (захвата), а также сервогидравлическим механизмом нагружения, имеющая следующие характеристики:

- диапазон нагрузок в испытании — от -15 до 15 кН со средней точностью 0,1%;
- диапазон частот при циклических испытаниях — 0,001–20Гц;
- тип контроллера — BISS SS2370;
- подключение к ПК через USB интерфейс;
- частота дискретизации при регистрации данных с датчиков ИМ — до 10000 Гц;
- возможность адаптивного контроля процесса циклического нагружения;
- возможность программного управления испытательной машины реализуется через USB интерфейс при помощи BISS® SDK, предоставляемого разработчиком, на языке C++.

2. Цифровая c-mount камера Basler piA2400-17gc:

- CCD-матрица Sony ICX625;
- размер —  $8,5 \times 7,1$  мм,
- разрешение —  $2454 \times 2056$  пикселей (5 Мп);
- частотой фотографирования — 17 кадров/с;
- масса — 220 г
- габаритные размеры —  $86,7 \times 44 \times 29$  мм;
- возможность программного управления камерой реализуется через интерфейс GigE при помощи BaslerPylon® SDK, предоставляемого разработчиком, на языке C++.

3. Моновидеомикроскоп Альтами MB0670Д без окуляров со встроенным трансфокатором, сменными объективами и CCD адаптерами различного увеличения. Микроскоп оснащен коаксиальной системой освещения при помощи светодиода.

- увеличения трансфокатора — в диапазоне 0.58X–7X (1:12,1);
- поле зрения — варьируется в диапазоне от  $21,1 \times 28,2$  мм до  $0,13 \times 0,17$  мм;
- крепление для камеры — типа c-mount;

4. Три прецизионные линейные направляющие:

- две горизонтальные — с диапазоном перемещения 50 мм, одна вертикальная — с диапазоном 30 мм;
- шаг резьбы — 1 мм

5. Шаговые двигатели PL42HD48 производства Purelogic, Россия с модулями управления, построенными на базе микроконтроллеров A4988 производства Allegro, Польша:

- число фаз — 2;
- Угловой шаг —  $1,8 \pm 5\%$ , (200 шагов на оборот);
- Ток фазы — 2,4 А;
- момент удержания — 5,5 кг·см;
- возможностью реализации дробного шага — до 1/16 (при шаге резьбы 1 мм обеспечивает точность до 0,3 мкм).

6. Персональный компьютер:

- процессор — AMD A6-5400K, два ядра, два потока,
- базовая частота процессора — 3,6 ГГц;
- ОЗУ — 8 ГБ DDR3 1600 МГц;
- операционная система — Windows 7.

### 3.3.5 Алгоритм распознавания трещины и определение ее вершины

Ключевыми работами в области обнаружения трещин на оптических изображениях объекта считаются работы К. Сонга и др. [118], а также К. Киршке с коллегами [119]. В дальнейшем, предложенные ими алгоритмы стали применяться для оценки состояния конструкций и выявлению в них трещин [120–122].

Разработанные алгоритмы способны работать в двух режимах обработки изображений: 1) обработка последовательности изображений с определением оптического потока и дифференцированного оптического потока, а также его последующей пороговой бинаризации; 2) анализ индивидуальных изображений и выделение контура трещины при помощи контурного анализа.

Используемый в работе алгоритм распознавания трещины и слежения за ней подробно описан в [123] и защищен патентом. В обобщенном виде процедура состоит из следующих этапов: 1) анализ последовательности изображений; 2) выделение объекта максимальной площади, соответствующего области наибольших неравномерностей на картине оптического потока; 3) анализ индивидуальных изображений; 4) построение скелетона трещины; 5) поиск вершины трещины.

Тестирование с использованием модельных изображений (включая размытые и зашумлённые) продемонстрировало, что алгоритм позволяет найти координаты вершины трещины со средней ошибкой порядка 56 пикселей. Примеры трех этапов расчета модельных изображений представлены на рисунке 3.12. Средняя ошибка определения площади трещины (включая выделение её берегов) не превышает 1,93%. Результаты тестирования алгоритма на экспериментальных изображениях показали возможности его эффективного применения для решения задач выделения трещин на реальных оптических изображениях. Пример обработки экспериментального единичного изображения изображен на рисунке 3.13а-г.

Предложенный алгоритм характеризуется максимальной ошибкой детектирования трещины в условиях сильного зашумления ( $s = 45$ ) равной 5,7%. В то же время величина ошибки резко возрастает в условиях размытия фильтром с  $a = 4,5$ , достигая 40%.

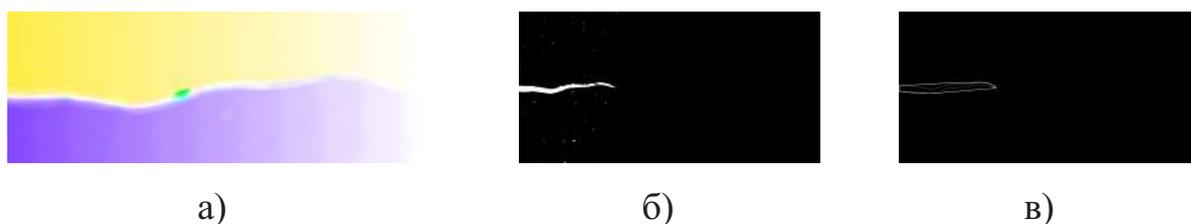


Рисунок 3.12 — Результаты анализа последовательности изображений на основе определения поля перемещений: (а) — изображение оптического потока; (б) — изображение дифференцированного оптического потока; (в) — алгоритмически определённая локализованная трещина.

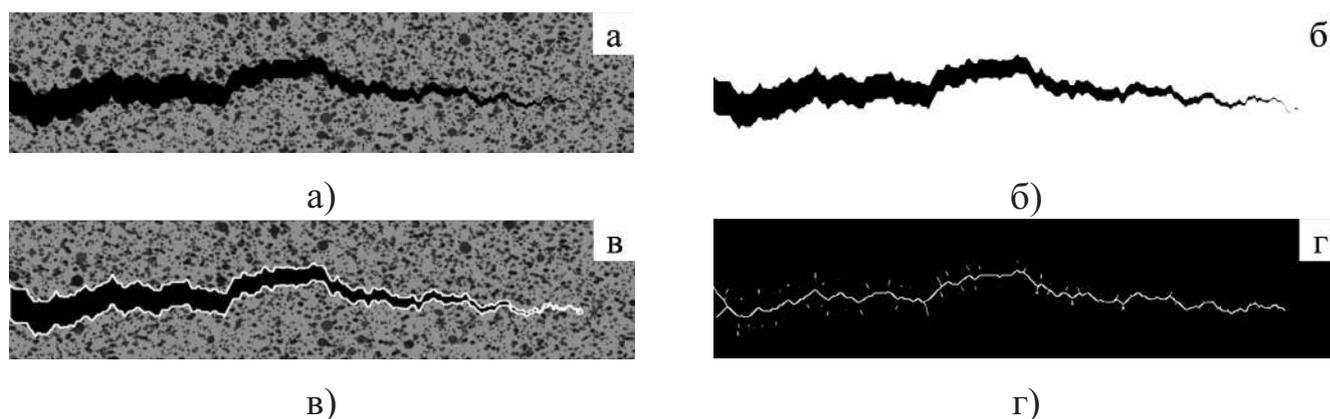


Рисунок 3.13 — Детектирование трещины при анализе индивидуального изображения на основе выделения контуров: а — входное изображение; б — бинаризованное изображение для сегментации; в — выделенная трещина; г — найденный скелетон трещины.

### 3.3.6 Параметры механики разрушения, получаемые при помощи ЛИДК

Определение различных параметров процесса распространения трещины в терминах механики разрушения полностью основывается на полях смещений и деформаций поверхности образца при помощи метода корреляции цифровых изображений.

#### *Механический отклик материала*

Одним из параметров, позволяющих качественно охарактеризовать поведение материала вблизи вершины трещины, является петля механического гистерезиса, где по оси  $Oy$  откладывается величина нагрузки, определенная по датчику нагрузки ИМ, а по оси  $Ox$  — величина раскрытия, определяемая по программному экстензометру, размещенному на поле смещений (DIC). Диаграмма нагружения и разгрузки принимает вид петли вследствие нелинейности отклика материала (рисунок 3.14). При этом увеличение доли пластической деформации

ведет к увеличению «ширины» петли, тогда как ее наклонный характер вызван влиянием открытия/закрытия трещины. Описываемая петля механического гистерезиса, состоит из трех участков:

- начальный линейный участок, когда трещина закрыта;
- участок нелинейности, вызванный открытием трещины на полуцикле нагрузки и закрытием трещины, на полуцикле разгрузки;
- конечный линейный участок, когда трещина полностью открыта.

Таким образом, анализируя внешний вид петли, можно давать качественную характеристику, происходящим в материале процессам. Численной оценкой может выступать максимальное значений деформации ( $\varepsilon_{max}$ ), достигаемое в каждой петле, что косвенно характеризует раскрытие трещины через податливость образца.

#### *Оценка уровня открытия/закрытия трещины*

Один из важных численных параметров, непосредственно влияющих на скорость распространения трещины, особенно на начальном этапе её роста и в режиме Пэриса, является уровень открытия/закрытия трещины, который можно определить как эффективную асимметрию цикла:

$$R_{eff} = \frac{P_{op}}{P_{max}} \quad (3.1)$$

где  $P_{op}$  — нагрузка, при которой трещины открывается,  $P_{max}$  — максимальная нагрузка в цикле.

В идеальном случае, когда закрытие трещины отсутствует, то петля механического гистерезиса имеет симметричную форму. Если провести прямую, соответствующую нагрузке  $(P_{max} - P_{min})/2$ , то она будет делить петлю на две равные по площади части. В присутствии закрытия, это условие не выполняется, и площадь нижней части петли становится меньше площади верхней. Основываясь на этом свойстве был разработан метод оценки уровня закрытия усталостной трещины на основе расчета площади петли механического гистерезиса.

Процедура расчета (рисунок 3.14) уровня закрытия состоит из:

1. определения площади, очерченной петлей;
2. определение такого уровня нагрузки  $P_{mean}$ , линия которой «разрезала» бы петлю на две равные по площади части —  $S_1$  и  $S_2$ ;
3. расчет эффективной асимметрии цикла ( $R_{eff}$ ) находится из выражения:

$$R_{eff} = 2 \frac{P_{mean}}{P_{max}} - 1 \quad (3.2)$$

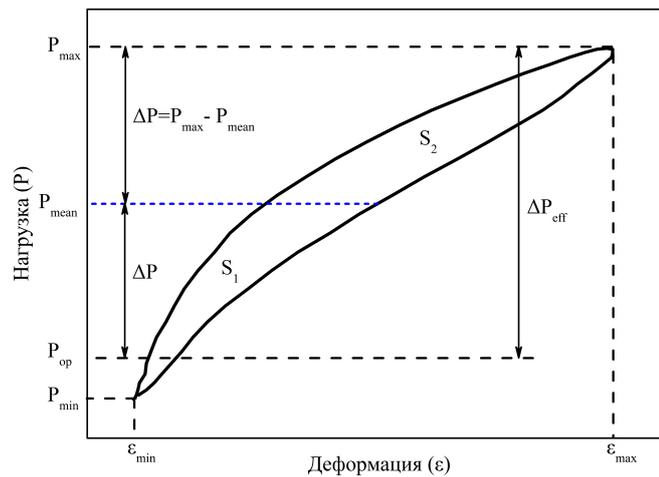


Рисунок 3.14 — Внешний вид петли механического гистерезиса и схема расчета уровня открытия/закрытия трещины.

### 3.3.7 Обсуждение точности рассчитываемых информативных параметров

Прежде чем перейти к тестированию комплекса, необходимо отметить, что при разработке ЛИДК как способа оценки процессов роста усталостной трещины важным вопросом становится точность определения параметров и стабильность получаемых результатов.

Возможные разбросы получаемых значений связаны со следующими факторами.

1. *Качество получаемых изображений*, включая размытие, контрастность, освещенность и др., что оказывает влияние на качество расчета векторов смещений и полей деформаций. Для снижения влияния данного фактора в работе производится многоступенчатая шлифовка, выполняемая сначала на крупной наждачной шкурке с постепенным снижением зернистости (Р600, Р1000, Р1500, Р2000), а затем полировка с использованием алмазной пасты. Такой подход позволяет получать гладкую поверхность, которая в тоже время содержит следы шлифовки в виде небольших царапин и раковин, которые необходимы для работы метода DIC.

Альтернативными методами подготовки поверхности могут выступать электро-химическая полировка, химическое травление после шлифовки, нанесение микроспекла путем литографии или иными методами. Традиционное нанесение спекла путем распыления краски из баллончика или аэрографа на большом увеличении дает низкое качество поверхности и крупные пятна краски, поэтому не является эффективными для решения обозначенных задач.

Согласно встроенному в программное обеспечение алгоритму для оценки ошибки определения координат векторов смещений используемый метод подготовки поверхности приводит к отклонениям на величину не более 0,1 пиксел в самых критических участках поверхности — у берегов трещины и между ними.

В отсутствие временного сглаживающего алгоритма, который производит сглаживание полей деформаций для нескольких состояний (кадров) в процессе нагружения, возможны отклонения получаемых значений деформаций для соседних изображений, что вызвано возникающими вибрациями камеры и перемещением (вращением) образца.

2. *Точность определения координат вершины трещины*, в которой проводятся измерения деформаций программным экстензометром. Предлагаемый алгоритм определения вершины трещины позволяет производить подобную оценку с ошибкой менее 2% для модельных изображений, где положение вершины известно. Для реальных испытаний отсутствуют какие-либо достаточно точные способы определения длины трещины (положения вершины) в процессе нагружения, что существенно усложняет процесс верификации. Точность предлагаемого алгоритма определения вершины трещины в реальном образце по сравнению с координатами, определяемыми квалифицированными операторами визуально, практически не отличимы и составляют разницу менее 20 пикселей, что для используемого масштаба составляет примерно  $\pm 10$  мкм.

Первые два описанных параметра оказывают влияние на все проводимые измерения и рассчитываемые информативные параметры. Далее, отдельно описываются ошибки, характерные для расчета конкретных параметров.

3. *Точность определения деформаций программным экстензометром*. Кроме двух описанных факторов выше, ошибка при определении точек петли механического гистерезиса и соответственно значения  $\varepsilon_{max}$  связано с длиной используемого программного экстензометра. Выбирая бóльшую длину, снижается разброс получаемых значений, но в тоже время снижается и чувствительность к локальным деформационным процессам, например, уменьшается доля пластической деформации. Эмпирическим способом было определено, что оптимальная длина программного экстензометра для используемых параметров нагружения составляет примерно половину радиуса монотонной пластической зоны, что для тестового испытания, описанного в разделе 3.4 составляет  $l=150$  мкм. Смещение положения экстензометра от определенного положения вершины трещины

на величину  $\pm 10$  мкм приводят к отклонениям рассчитываемых информативных параметров менее чем на 4%.

4. *Точность определения площади петли и  $R_{eff}$ .* Точность расчета данных величин зависит от первых трех пунктов, а также от степени синхронизации прикладываемой нагрузки  $P_i$  (по данным датчика ИМ) со значением деформации  $\varepsilon_i$  (получаемым методом DIC). Кроме того, при расчете осуществляется кусочно-линейная интерполяция значений. Согласно проведенным оценкам общий вклад обоих факторов в величину ошибки и возможные разбросы значений незначительны и могут не учитываться.

После того, как был проведен детальный анализ каждого выявленного фактора, который может оказывать влияние на разброс в получаемых значениях информативных параметров в терминах механики разрушения, было проведено тестовое испытание, где к образцу прикладывалось 12 циклов, разбитых на 4 блока. В процессе каждого цикла производилось фотографирование поверхности образца с трещиной. При анализе результатов оценивалось отклонение получаемых значений информативных параметров для всех 12-ти циклов. Средняя ошибка измерения, полученная в эксперименте, составила  $\approx 1\%$  при определении  $\varepsilon_{max}$  и  $\approx 7\%$  при расчете площади петли и уровня закрытия трещины. Повышенный разброс при определении площади петли вызван влиянием малой частоты нагружения во время фотографирования, что незначительно, но сказывается на поведении трещины.

### **3.4 Тестирование методики оценки параметров механики разрушения для усталостной трещины в плоском образце из алюминиевого сплава Д16Т**

Как было теоретически и экспериментально продемонстрировано в разделе 3.2, зная параметры роста трещины при базовом уровне циклической нагрузки, и приложив перегрузку, можно достаточно точно спрогнозировать поведение трещины после единичной перегрузки. Цель раздела: провести тестирование ЛИДК, а также разработанной методики на основе DIC для изменения параметров роста усталостной трещины (в терминах механики разрушения) в испытании с приложением единичного цикла перегрузки.

### 3.4.1 Материал и методика тестирования

Для тестирования использовался образец, вырезанный электроэрозионной резкой из листа алюминиевого сплава Д16Т толщиной 3 мм. Форма и основные размеры образца представлены на рисунке 3.15.

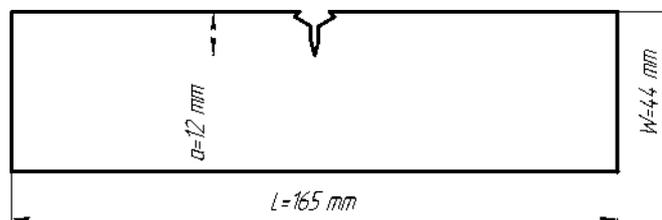


Рисунок 3.15 — Форма образца для проведения испытаний.

Данный образец имеет боковой надпил с предварительно выращенной усталостной трещиной на длину 1,7 мм. При проведении тестового испытания ЛИДК, образец фиксировался в захватах ИМ, проводилась необходимая настройка и калибровка системы позиционирования и оптической системы. В итоге ширина области фотографирования была выбрана 2,5 мм, что составляет в физическом масштабе 1,04 пиксел/мкм.

Для прогнозируемого изменения параметров роста трещины был использован описанный в разделе 3.2 подход, связанный с прикладыванием перегрузок. Такое однократное воздействие прогнозируемо и мгновенно изменяет условия роста трещины, которые затем могут быть зафиксированы предлагаемым способом. Поэтому схема проведения испытания является сложной последовательностью приложения нагрузок схематично представленной на рисунке 3.16 и имеющей следующий алгоритм:

1. производится циклическое нагружение в базовом диапазоне нагрузок 0,25–2,5 кН до тех пор, пока трещина не достигнет величины 2,5 мм (т.е. прирост должен составить 0,8 мм);
2. после проращивания трещины прикладывается цикл нагружения, в течение которого камера производит фотографирование поверхности образца с частотой 3 кадра/с, этот цикл — опорный цикл измерения;
3. затем прикладывается перегрузка с амплитудой на 50% больше базовой (3,75 кН), во время которого также регистрируются изображения;
4. после приложения перегрузки происходит дальнейшее циклическое нагружение на базовом уровне, однако в отдельных циклах запускается регистрация фотографий, чтобы проследить изменение характера роста усталостной

трещины. Номера циклов, в которых производится фотографирование, после перегрузки: 1, 2, 3, 10, 25, 100, 500, 4000, 10000, 15000, 24000, 28000 и 37000 циклов. Данные циклы именуется в работе измерительными циклами.

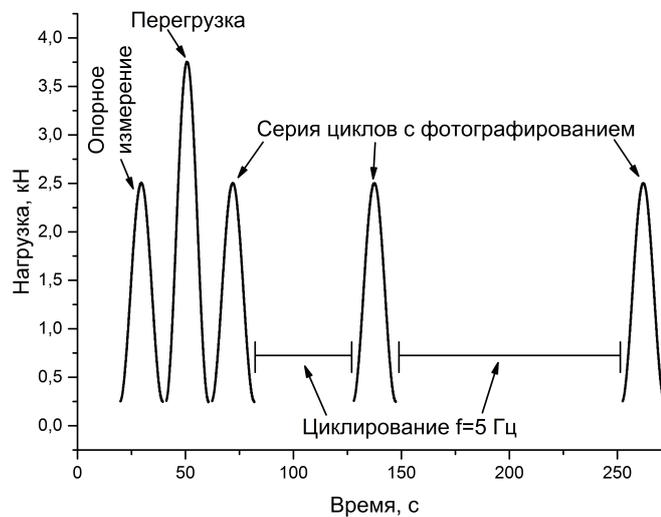


Рисунок 3.16 — Схема нагружения для испытания с единичной перегрузкой.

Параметры базового цикла  $P_{max}=2,5$  кН,  $P_{min}=0,25$  кН, асимметрия  $R=0,1$ .

Цикл перегрузки  $P_{OvL}=3,75$  кН. Длина трещины  $a=14,5$  мм. Коэффициенты интенсивности  $K_{max}=12,86$  МПа $\sqrt{м}$ ,  $K_{min}=1,29$  МПа $\sqrt{м}$ ,  $K_{OvL}=19,3$  МПа $\sqrt{м}$ .

Все измерительные циклы имели частоту нагружения 0,05 Гц с одновременным фотографированием с частотой 3 кадра/с. Таким образом, записывали 60 кадров в течение цикла «нагрузки-разгрузки». Между циклами измерения продолжалось «базовое» циклирование, но с большей частотой — 5 Гц. Полученные серии изображений далее обрабатывают при помощи метода корреляции цифровых изображений с целью вычисления полей деформаций и параметров механики разрушения.

### 3.4.2 Результаты тестирования и их обсуждение

Для отображения результатов испытания важным параметром является то, насколько далеко трещина прорастает в пластическую зону, вызванную перегрузкой. По результатам расчета радиус этой зоны составляет  $r_{OvL}=580$  мкм, таким образом, если трещины проросла на 290 мкм, то она достигла  $50\%r_{OvL}$ .

На первом этапе на основе фотографий определялась длина трещины и средняя скорость ее роста за цикл между циклами измерений. Зависимость параметра  $da/dN$  от расстояния, на которое трещина проросла в пластическую зону, вызванную перегрузкой, представлена на рисунке 3.17. Из представленного

графика видно, что скорость роста трещины до перегрузки примерно 0,01 мкм/цикл. Далее прикладывается перегрузка, во время которой трещина вырастает на 35 мкм. Первые три цикла рост трещины незаметен, однако на 10-м цикле скорость ее роста составляет уже  $\approx 0,6$  мкм/цикл и постепенно снижается, достигая минимума после прорастания трещины на 30% от радиуса (200 мкм или 15 000 циклов), после чего скорость начинает возрастать.

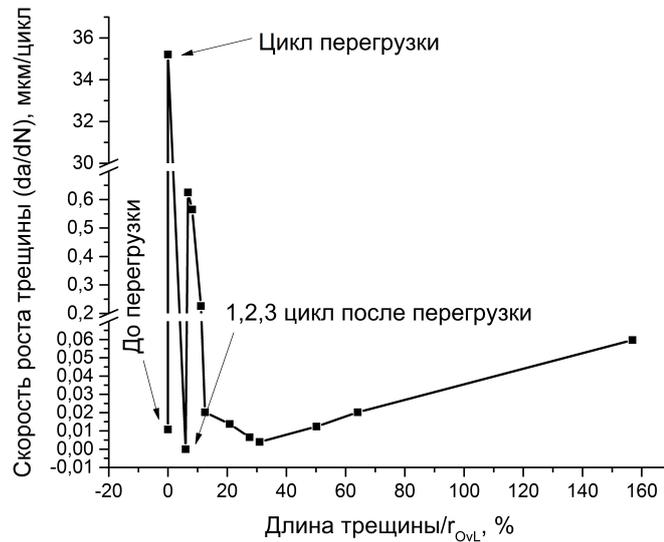


Рисунок 3.17 — График зависимости скорости роста трещины от расстояния, на которое трещина проросла в пластическую зону, вызванную перегрузкой ( $r_{OvL}$ ).

В целях наглядности представления данных ось ординат имеет два разрыва.

Вторым параметром, характеризующим изменение реакции материала на прикладываемую нагрузку, является максимальное значение деформации в вершине трещины —  $\varepsilon_{max}$ , представленное на графике на рисунке 3.18. Видно, что  $\varepsilon_{max}$  после перегрузки достаточно быстро снижается, пока трещина не достигнет длины в  $20\%r_{OvL}$ , где стесненность материала вблизи вершины трещины максимальная — материал деформируется на минимальную величину при постоянных прикладываемых нагрузках. Затем, следует достаточно быстрый рост значений  $\varepsilon_{max}$  до уровня выше начального (до перегрузки).

Оценка уровня открытия/закрытия трещины проведена согласно методике, описанной в разделе 3.3.6, результаты расчетов представлены на рисунке 3.19. Горизонтальной линией отмечено значение асимметрии при базовом уровне нагрузок  $R=0,1$ , т.е. значения меньше 0,1 означают, что трещина полностью открыта в течение всего цикла. До перегрузки закрытие трещины минимально и составляет всего 0,115 от  $P_{max}$ . В цикле перегрузки и сразу после него трещина остается полностью открытой, что связано с «притуплением» вершины

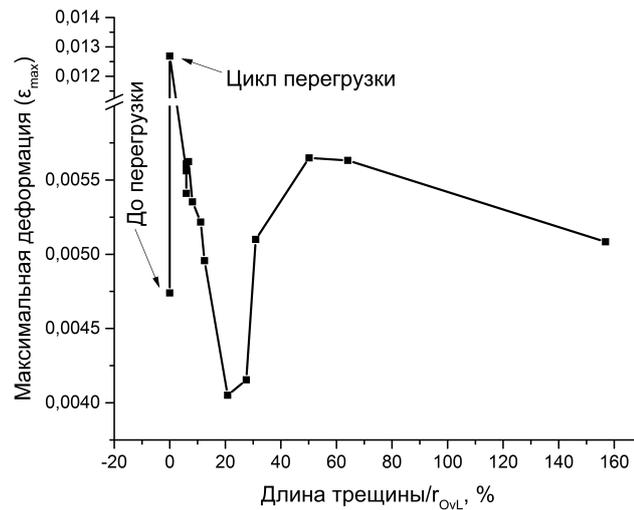


Рисунок 3.18 — Зависимость максимальной деформации  $\epsilon_{max}$  от расстояния, на которое трещина проросла в пластическую зону, вызванную перегрузкой.

трещины вследствие пластических деформаций. При дальнейшем циклическом нагружении происходит продвижение вершины трещины в пластическую зону, вызванную перегрузкой, сопровождающееся, во-первых, «заострением» вершины, и, во-вторых, усиливающимся воздействием окружающего пластически деформированного материала. Это приводит к росту уровня закрытия, а также к возрастанию порогового значения  $\Delta K_{th}$ , который невозможно определить при помощи метода DIC. Кроме того, открытие/закрытие трещины — процесс протяженный во времени, поэтому точки, лежащие вблизи  $R=0,1$ , уже могут оказывать влияние на скорость роста трещины. Под воздействием двух описанных факторов при  $R_{eff}=0,05$  скорость роста трещины уже начинает снижаться. Минимальное значение скорости роста трещины совпадает с максимальным уровнем закрытия — при  $\approx 30\% r_{OvL}$ . При приближении вершины трещины к границе пластической зоны ( $70\% r_{OvL}$ ) влияние перегрузки становится практически незаметным, уровень закрытия снижается, имея значение немного выше базового (до перегрузки).

### 3.4.3 Заключение по разделу 3.4

В разделе 3.4 проведено тестирование автоматизированного ЛИДК и предложенных методов расчета параметров роста трещины (в терминах механики разрушения) в алюминиевом образце с боковым надпилком. Процедура проведения испытания включала приложение единичного цикла перегрузки, что

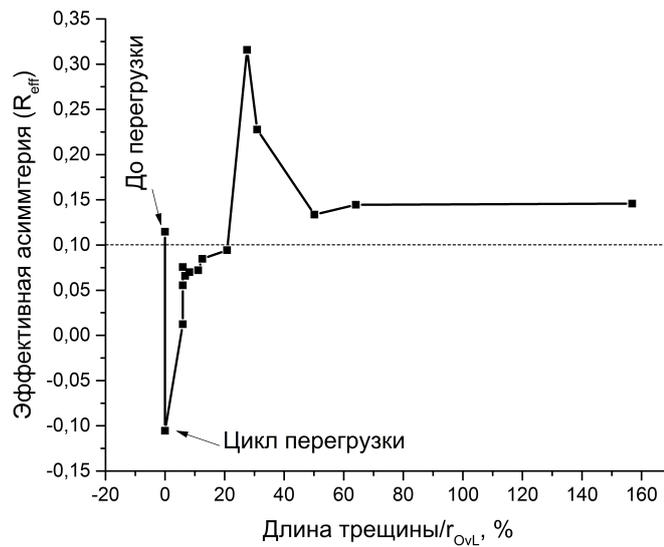


Рисунок 3.19 — Зависимость  $R_{eff}$  от расстояния, на которое трещина проросла в пластическую зону, вызванную перегрузкой.

гарантировало предсказуемое изменение параметров процесса роста трещины в рамках разработанного в разделе 3.2 метода.

Было получено, что предложенный метод обработки и анализа оптических изображений позволяет выявить влияние единичного цикла перегрузки на внешний вид петель механического гистерезиса. Для наблюдаемых качественных изменений была проведена количественная оценка в терминах механики разрушения: скорость роста трещины ( $da/dN$ ), максимальная деформация материала вблизи вершины трещины ( $\varepsilon_{max}$ ) и эффективная асимметрия цикла ( $R_{eff}$ ).

Анализ результатов показывает, что полученные данные согласуются с результатами исследований, выполненных в разделе 3.2, а также с построенными в ней аналитическими моделями роста трещины, что свидетельствует о работоспособности предлагаемого метода.

Было показано, что минимальная скорость роста трещины соответствует  $30\%r_{OvL}$ , при этом деформации материала в вершине трещины также минимальны, а величина закрытия принимает наибольшее значение. Таким образом, можно говорить о том, что прикладываемая нагрузка не приводит к деформации материала у вершины трещины вследствие явления закрытия, поэтому интенсивность процессов роста трещины снижается.

После того как трещина проросла на  $70\%r_{OvL}$  величина эффективной асимметрии восстановилась практически на начальный уровень, что свидетельствует о снижении влияния пластической зоны перегрузки на рост трещины, а возрастание скорости роста вызвано возрастанием величины  $\Delta K$ .

### 3.5 Заключение по Главе 3

В главе 3 был проведен анализ процессов роста усталостной трещины, разработан и метод управления этим процессом, основанный на приложении циклов перегрузки/разгрузки различной последовательности и амплитуды. С использованием РЭМ-фрактографического анализа продемонстрировано влияние параметров  $\delta K_{eff}$  и  $\delta K_{th}$  на процесс роста усталостной трещины. На основе полученных результатов проведена постановка задачи по разработке лабораторного комплекса для оценки параметров роста трещины в терминах механики разрушения.

Разработана принципиальная схема и алгоритм функционирования лабораторного исследовательско-диагностического комплекса (ЛИДК) для оценки параметров роста усталостной трещины в металлических материалах. На основании разработанной схемы и алгоритма его работы создан комплекс, предназначенный для проведения испытаний на усталость в автоматическом режиме. Это позволяет проводить фотографирование поверхности образца с возможностью слежения за вершиной распространяющейся трещины и перемещением за ней оптической системы, а также автоматической фокусировкой.

В разработанном комплексе оценка параметров усталостного разрушения в терминах механики разрушения производится на основе метода корреляции цифровых изображений, который позволяет путем обработки оптических изображений поверхности рассчитывать поля деформации. Непосредственно оцениваемые параметры включают: скорость роста трещины ( $da/dN$ ), максимальную локальную деформацию материала в цикле ( $\varepsilon_{max}$ ), эффективную асимметрию цикла ( $R_{eff}$ ). Продемонстрирована взаимосвязь всех оцениваемых параметров со скоростью роста усталостной трещины.

## **Глава 4. Прикладные задачи по оценке усталостного разрушения конструкционных материалов**

### **4.1 Разработка методики комбинированного оптико-акустического мониторинга поврежденности стеклопластиковых композитов (GFRP) при циклическом нагружении**

#### **4.1.1 Введение к разделу 4.1**

Компания LM Wind Power (Дания) занимается разработкой и производством лопастей на основе стеклянных волокон для ветряных электростанций. Появление новых материалов или усовершенствование производственной технологии, открытие новых линий производств или контроль качества уже имеющихся производственных линий требует проведения регулярных разрушающих испытаний образцов стеклопластиков на статическую и циклическую прочность. Проведение подобных испытаний на регулярной основе требует высоких финансовых и временных затрат. Существенным ограничением здесь является невысокая частота циклирования (не более 5 Гц) и большое количество циклов наработки (до  $10^4$ – $10^6$  циклов). В связи с вышеуказанным актуальным направлением исследований и разработок является сокращение времени проведения испытания с сохранением достоверности получаемых результатов.

В рамках сотрудничества компаний LM Wind Power, BiSS ITW и лаборатории МПКМ ИФМП СО РАН было предложено адаптировать разработанную в работе методику, а также испытательно-мониторинговый комплекс оптико-акустического мониторинга состояния для контроля стеклопластиковых образцов в процессе испытания с возможностью определения их текущего (механического) состояния и остаточного ресурса работы. Это позволит остановить испытание на заданном этапе наработки и прогнозировать количество циклов при разрушении на основании построенной модели без продолжения дальнейшего циклического нагружения.

Особенностью деформирования композиционных материалов на основе полиэстера, армированного стеклянными волокнами, являются большие упругие деформации и отсутствие пластической деформации. В связи с этим локализация деформаций, которая свидетельствует о наличии повреждений, проявляется крайне слабо и метод корреляции цифровых изображений не позволит получить требуемую информацию о состоянии образцов. Поскольку стекловолокно

с матрицей из полиэстера является полупрозрачным, то возникающие в процессе циклического нагружения повреждения и дефекты (микро- и макротрещины, расслоения и т. д.) изменяют прозрачность образца. Это проявляется в виде формирования матовых областей (рисунок 4.1).

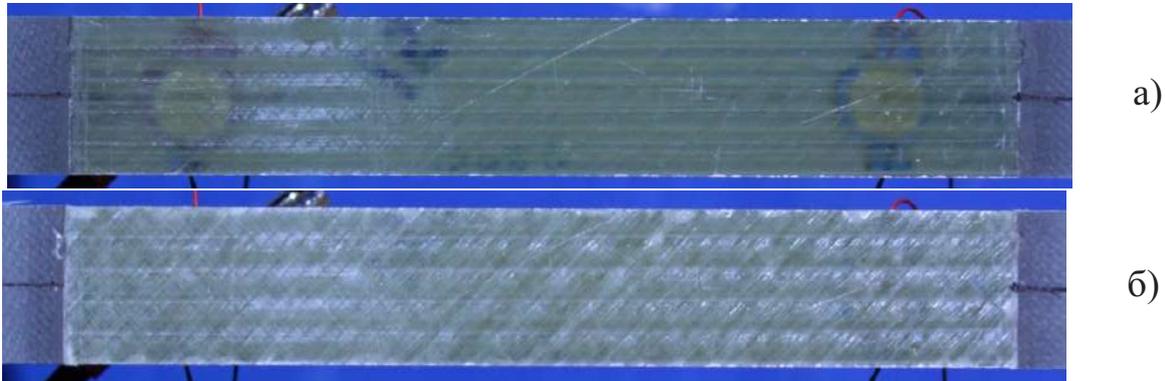


Рисунок 4.1 — Фотографии образцов стеклопластикового композита (а) в начале испытания и (б) перед разрушением. Растрескивание матрицы в верхнем слое проявляется в виде полос, ориентированных под углом  $45^\circ$ , а внутренние расслоения представляют собой белые области, в данном случае, расположенные преимущественно по внешнему периметру образца.

Цель исследований в данном разделе являлось разработка методики выявления характерных этапов разрушения стеклопластикового композиционного материала в процессе циклического нагружения, основанной на комбинированном оптико-акустическом контроле (анализ фотографий поверхности и волн Лэмба).

#### 4.1.2 Описание методики для мониторинга поврежденности стеклопластиковых композитов

Методика оценки стадийности разрушения стеклопластиковых образцов основана на использовании разработанного в главе 2 испытательно-мониторингового комплекса, который был модифицирован заменой метода DIC на другой оптический метод мониторинга, основанный на оценке качества изображений поверхности образца. При этом все остальные аппаратные и программные составляющие комплекса не подвергались изменению:

– Циклические испытания осуществлялись на сервогидравлической испытательной машине Biss UTM 150;

– Генерация и регистрация акустических сигналов производилась с использованием цифрового осциллографа с функцией генератора Handyscope HS5-220;

– Фотографирование поверхности выполнялось на цифровую фотокамеру Canon EOS 700D, оснащенную объективом Canon EF 70-300 mm 4-5.6L;

– В качестве пары датчик-генератор использовались ПЭП AW1E12G-190EFL1Z (Audiowell Corp, Китай).

Циклическое нагружение проводилось в режиме контроля нагрузки («мягкий режим»), однако величина максимальной нагрузки в цикле определялась таким образом, чтобы удлинение в начале испытания достигало значений а) 0.85%, б) 0.77% и в) 0.69%. Частота циклического нагружения составляла 5 Гц и асимметрией цикла  $R=0,1$ . Процесс фотографирования поверхности образца и записи акустических сигналов осуществлялась через каждые 1000 циклов без остановки испытания. Предварительные эксперименты показали, что акустический сигнал, усредненный по 100 измерениям, не имеет существенных отличий от сигнала, записанного с остановкой нагружения.

Как уже было отмечено ранее, матрица образца, являясь полупрозрачной, под воздействием прикладываемых циклических нагрузок изменяет свой внешний вид. Данное изменение вызвано процессами разрушения, происходящими в материале — появление трещин, формирование рельеф и т. п. Таким образом, методика оценки степени поврежденности материала основана расчете на двух метрик, которые численно характеризуют изменения поверхности образца и тем самым позволяют провести оценку состояния образца (степени его поврежденности).

Используемые в предлагаемом методе метрики:

1. Среднеквадратичная ошибка (в англоязычной литературе: mean square error, MSE). Метод оценки MSE основан на вычислении среднеквадратичной ошибки между двумя изображениями по формуле:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - Y_i)^2 \quad (4.1)$$

где  $N$  — общее количество пикселей,  $\hat{Y}_i$  — яркость пикселя текущего изображения,  $Y_i$  — яркость пикселя исходного изображения.

Данная метрика позволяет охарактеризовать отклонение яркости изображения, получаемого в процессе циклического нагружения, от базового, полученного перед началом испытания.

2. Среднее значение информационной энтропии (мера энтропии Шеннона), рассчитываемая согласно следующей формулы:

$$H = - \sum_{i=1}^{255} \frac{HIST_i}{255} \log_2 \frac{HIST_i}{255} \quad (4.2)$$

где  $i$  — значение яркости пикселя,  $HIST_i$  — общее количество пикселей на всем изображении со значением яркости  $i$ .

Мера энтропии Шеннона также основана на сравнении гистограмм яркости изображения исходного (недефектного) образца с изображением образца, подвергнутого циклическому нагружению.

Для проведения тестирования предлагаемой методики оценки степени поврежденности стеклопластиковых композитов были использованы образцы со скошенными накладками, представленные на рисунке 4.2. Стеклопластиковый композиционный материал имеет укладку стекловолокна типа Е по схеме  $[0^\circ]$  и матрицей на основе полиэстера. Поверхностные слои имеют армирование по схеме  $[+45^\circ, -45^\circ]$ .

На поверхность образца приклеивались пьезопреобразователи, согласно процедуре, описанной в разделе 2.1.4. Один преобразователь (ПЭП 1) использовали в качестве генератора волн Лэмба, а второй (ПЭП 2) регистрировал упругие колебания, прошедшие вдоль рабочей зоны образца.

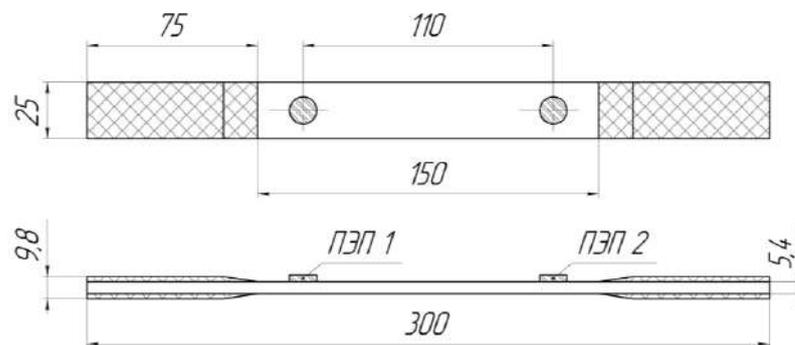


Рисунок 4.2 — Образец стеклопластикового композита для проведения циклических испытаний.

С использованием методики, представленной в разделе 2.1.6, были определены оптимальные частоты зондирующей акустического сигнала. Соответствующий график амплитудно-частотной характеристики представлен на рисунке 4.3.

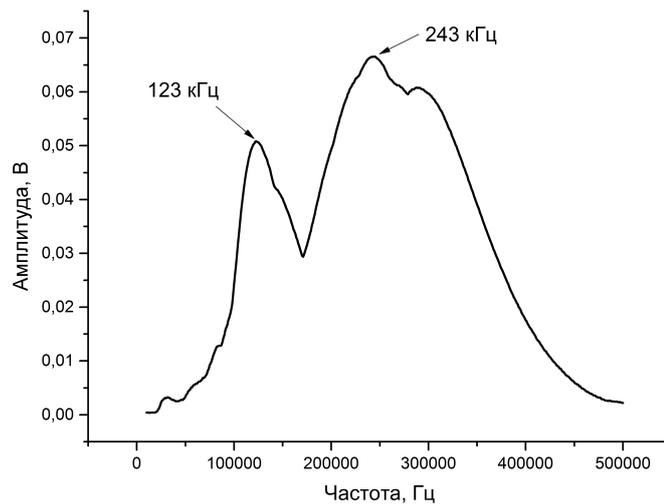


Рисунок 4.3 — Пример амплитудно-частотной характеристики для определения резонансных частот в используемой схеме испытания.

Для резонансных частот  $f=123$  кГц и  $f=243$  кГц были рассчитаны скорости распространения симметричной  $S_0$  и асимметричной  $A_0$  волновых мод, а также их длина в исследуемом композите. Результаты расчетов представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 — Рассчитанные значения групповой скорости и длины симметричной и антисимметричной волн Лэмба в образцах GFRP.

Частота, кГц	МГц·мм*	Симметричная мода ( $S_0$ )		Антисимметричная мода ( $A_0$ )	
		Скорость, м/с	Длина волны, мм	Скорость, м/с	Длина волны, мм
123	0,66	3900	31	1800	14
243	1,33	3700	15	2400	10

\*толщина образца составляет 5,4 мм

### 4.1.3 Тестирование разработанной методики

При проведении испытания образцов на усталость регистрировалось три вида данных: тензометрия, фотографии поверхности, прошедшие через рабочую зону образца УЗ волны Лэмба.

### Анализ данных тензометрии

В качестве основного и достоверного параметра, характеризующего степень деградации исследуемого композита на макромасштабе (интегрально), при тестировании методики была выбрана величина удлинения образца (разность между длиной образца при максимальной и минимальной нагрузке в цикле) именуемая в механике разрушения как податливость.

Графики зависимости нормированного удлинения для трех образцов от величины наработки (в %) представлены на рисунке 4.4. Количество приложенных циклов в долях %. При этом 0% означает начало испытаний, а 100% — момент разрушения образца.

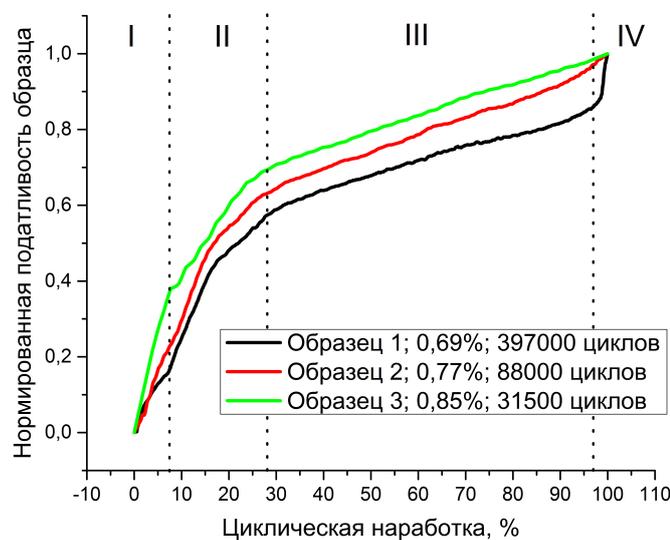


Рисунок 4.4 — Изменение податливости для трех образцов в процессе циклического нагружения. Графики нормированного удлинения образца в зависимости от процентной доли наработки, где 0% — начало испытаний а 100% — разрушение образца. В поле «легенды» для каждого образца указаны максимальная деформация в цикле в начале испытания и количество циклов до разрушения. Вертикальные пунктирные линии разделяют процесс разрушения на стадии, пронумерованные римскими цифрами.

Процесс разрушения материала, в том числе и композиционного, разделяется по времени на характерные стадии. Вертикальные линии отображают деление графика на 4 стадии, которые пронумерованы римскими цифрами. Обобщенные данные по окончанию каждой стадии в абсолютных (количество циклов) и относительных (%) величинах представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 — Стадии разрушения образцов GFRP при циклическом нагружении, полученные на основе графиков податливости на рисунке 4.4

Стадия	Окончание стадии (Образец 1 0,69%)		Окончание стадии (Образец 2 0,77%)		Окончание стадии (Образец 1 0,85%)	
	%	циклы	%	циклы	%	циклы
I	7,5	30 000	7,8	7 000	9,3	3000
II	28	110 000	26,5	23 000	25	8000
III	97,2	380 000	94,5	83 000	100	31 500
IV	100	397 000	100	88 000		

На первой стадии удлинение образца характеризуется быстрым линейным ростом в течение первых 7,5% от общей величины наработки для образца 1 и 2, и 9% для более тяжело нагруженного образца 3.

Поведение кривой на второй стадии носит нелинейный (параболический) характер, поэтому она является переходной от быстрого линейного возрастания на первой стадии к замедленному росту на третьей. Продолжительность этой стадии в (%) от общей наработки тем меньше, чем выше максимальная нагрузка в цикле: 20,5% для первого образца, 18,7% для второго и 15,7% для третьего.

Третья стадия характеризуется замедленным (относительно первой стадии) установившимся возрастанием податливости в течение продолжительного времени и занимает около 70% от общего числа циклов до разрушения.

Завершающая стадия IV — это этап быстрого протекания процессов разрушения, которая практически не проявляется для третьего образца (0,85%), так как в этом случае разрушение происходит практически мгновенно без существенных изменений податливости. Несмотря на то, что момент начала стадии для второго образца (измеренный в процентах) происходит несколько раньше, но, во-первых, он менее выражен на кривой, а, во-вторых, продолжительность стадии в циклах существенно меньше (5 000 против 17 000 для образца 1).

Величина податливости образца, являясь физическим параметром, измеряемым напрямую по датчику перемещения, играет роль базовой характеристики, которая надежно и достоверно демонстрирует поведение материала в заданных условиях. Показано, что данный параметр имеет выраженные 4 стадии, связанные с процессами разрушения образца. Таким образом, эти стадии выбраны эталонной характеристикой для дальнейшего анализа результатов акустического и оптического контроля состояния.

#### *Результаты мониторинга оптическим методом*

Анализ оптическим методом подразумевает расчет двух метрик — средне-квадратичной ошибки и энтропии Шеннона, изменение которых в зависимости от величины наработки представлены на рисунке 4.5а и рисунке 4.5б соответственно. Дополнительно на графики нанесены вертикальные штриховые линии, которые соответствуют стадиям, выявленным по данным тензометрии.

На начальном этапе, стадия I, происходит быстрый рост обоих параметров, что свидетельствует о существенном изменении светопропускания и отражательной способности образца вследствие растрескивания матрицы. Даже за первые 1000 циклов у образца 1, испытываемого при самой низкой нагрузке в цикле, происходит появление многочисленных трещин преимущественно в верхнем слое (рисунок 4.1) с армированием по схеме  $[+45^\circ, -45^\circ]$ , что и обуславливает изменение анализируемых метрик.

Значение энтропии Шеннона (рисунок 4.5б) на стадии III замедляет свой рост и к концу стадии «выходит в насыщение» и на последующих этапах характеризуется лишь незначительным восходящим трендом. При этом значение MSE (рисунок 4.5а) на стадии II возрастает существенно быстрее, чем величина энтропии, однако, также достигает насыщения. Такое возрастание свидетельствует о продолжающемся процессе растрескивания матрицы композита.

На стадии III значения обеих метрик существенно не изменяются, следовательно, растрескивания матрицы не происходит или развивается незначительно. На стадии IV заметно возрастание и MSE, и энтропии, однако, дать достоверную характеристику протекающих процессов затруднительно, так как продолжительность участка мала, а величины изменения близки по значениям к осцилляциям, наблюдаемым на предыдущем участке.

#### *Результаты мониторинга волнами Лэмба*

В данном разделе проведен анализ трех параметров, характеризующих изменения в регистрируемом акустическом сигнале в процессе циклического

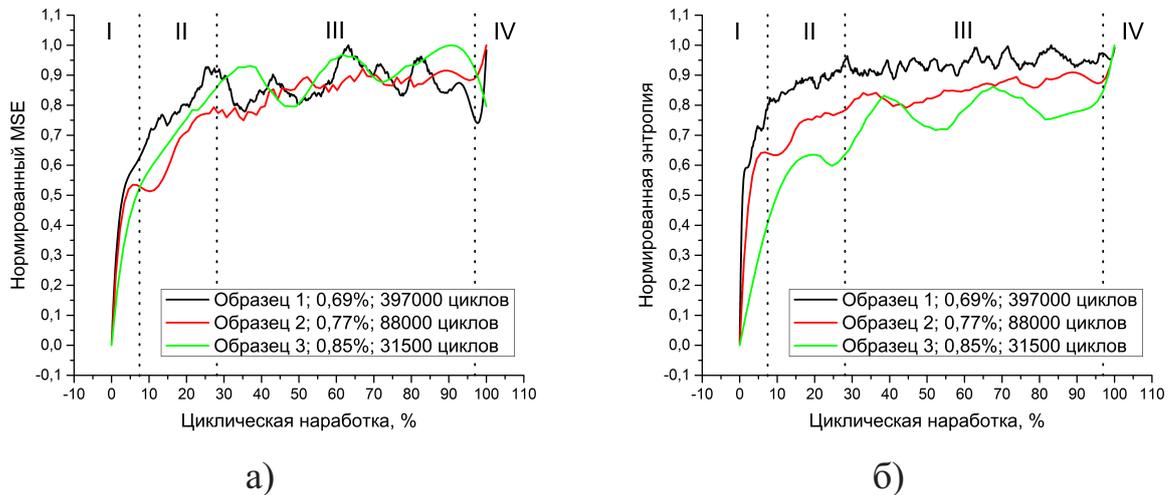


Рисунок 4.5 — Изменение информативных параметров, рассчитанных по оптическим изображениям, в зависимости от величины наработки для трех образцов: (а) — среднеквадратичная ошибка (MSE), (б) — энтропия Шеннона. В поле «легенды» для каждого образца указаны максимальная деформация в цикле в начале испытания и количество циклов до разрушения. Вертикальные пунктирные линии разделяют процесс разрушения на стадии, пронумерованные римскими цифрами.

нагрузки. При проведении УЗК были использованы две частоты:  $f=123$  кГц и  $f=243$  кГц, которые соответствуют различным доминирующим в сигнале модам колебаний:  $A_0$  и  $S_0$  соответственно. На каждом графике, как и ранее, вертикальные штриховые линии разделяют стадии, выявленные по результатам интерпретации данных с датчика перемещений (податливость).

Первым анализируемым параметром является максимальное значение огибающей сигнала (рисунок 4.6), которое соответствует максимальной амплитуде принимаемых акустических колебаний.

Анализ графиков на рисунке 4.6а, соответствующих частоте зондирующего сигнала  $f=123$  кГц, показал следующее. На стадии I происходит резкое снижение значения огибающей, которое достигает при этом своего минимума. На начале II-й стадии для образца 2 (0,77%) и 3 (0,85%) наблюдается рост значений, тогда как для образца 1 поведение кривой имеет более сложный вид: локальный максимум приходится как раз на момент перехода от первой стадии ко второй, в то время как на второй стадии значения анализируемого информативного параметра сначала снижаются, затем возрастают, что свидетельствует о процессах, происходящих в данном образце, которые не выявляются по показаниям датчика перемещения. Характер изменения параметра на III-ей стадии

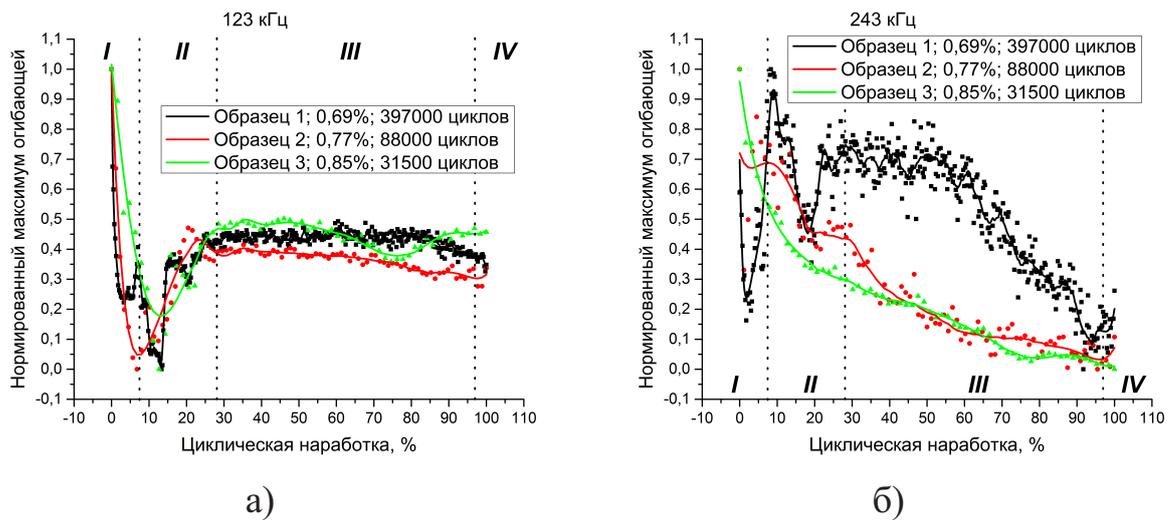


Рисунок 4.6 — Зависимость максимального значения огибающей сигнала от величины наработки для трех образцов. Частота зондирующего акустического сигнала (а) —  $f=123$  кГц и (б) —  $f=243$  кГц. В поле «легенды» для каждого образца указаны максимальная деформация в цикле в начале испытания и количество циклов до разрушения. Вертикальные пунктирные линии разделяют процесс разрушения на стадии, пронумерованные римскими цифрами.

для всех трех образцов одинаков и имеет вид горизонтальной линии, которая не меняется при переходе к стадии VI у образцов 2 и 3, однако демонстрирует падение для образца 1.

Иной характер демонстрируют результаты для зондирующей частоты  $f=243$  кГц (рисунок 4.6б). Для образца 3 изменение максимального значения огибающей в процессе циклирования характеризуется монотонным снижением без точек перегиба: резкое снижение на участке I, более плавное на участке II и медленное, начиная с III-й стадии и вплоть до разрушения. График для образца 2 имеет схожий характер изменения. Наиболее сложное поведение демонстрирует график для образца 1. Резкое падение сменяется резким возрастанием на первой стадии, после чего, на стадии II вновь наблюдается спад и рост значений, что завершается при переходе к стадии III. В течение первой половины третьей стадии значения остаются примерно постоянными, но после  $\approx 60\%$  наработки происходит их снижение. Однако, на финальном этапе, амплитуда сигнала, наоборот, возрастает.

Таким образом, параметр максимального значения огибающей сигнала чувствителен к возрастанию поврежденности материала под действием циклических нагрузок. Характер его изменения коррелирует со стадийностью, выделенной при анализе податливости образцов. Однако, поведение графика

для образца 1 существенным образом отличается от графиков для образцов 2 и 3 на двух начальных этапах на обеих частотах, имея множество максимумов и минимумов. Это указывает на развитие дополнительных процессов разрушения, которые, во-первых, не выявляются интегральной оценкой по податливости и не имеют место при испытаниях при более высоких нагрузках.

Второй параметр, использовавшийся для анализа, — нормированный коэффициент корреляции. Зависимости значений данного параметра от величины наработки изображены на рисунке 4.7. На рисунке 4.7а для частоты  $f=123$  кГц кривые можно разделить на три участка. На первом этапе происходит резкое снижение значений, на втором — скорость снижения уменьшается, переходя на третьем участке в горизонтальную линию. Кривые параметра NCC для образца 1 и образца 2 для частоты  $f=243$  кГц (рисунок 4.7б) можно разделить на два участка: участок резкого падения и на горизонтальный участок. При этом переход от одного участка ко второму осуществляется для образца 1 после 4,5% наработки, для образца 2 — 8%. У образца 3 присутствует промежуточная стадия, характеризующая переход между резким падением и горизонтальным участком (её продолжительность от 13% до 28,5%).

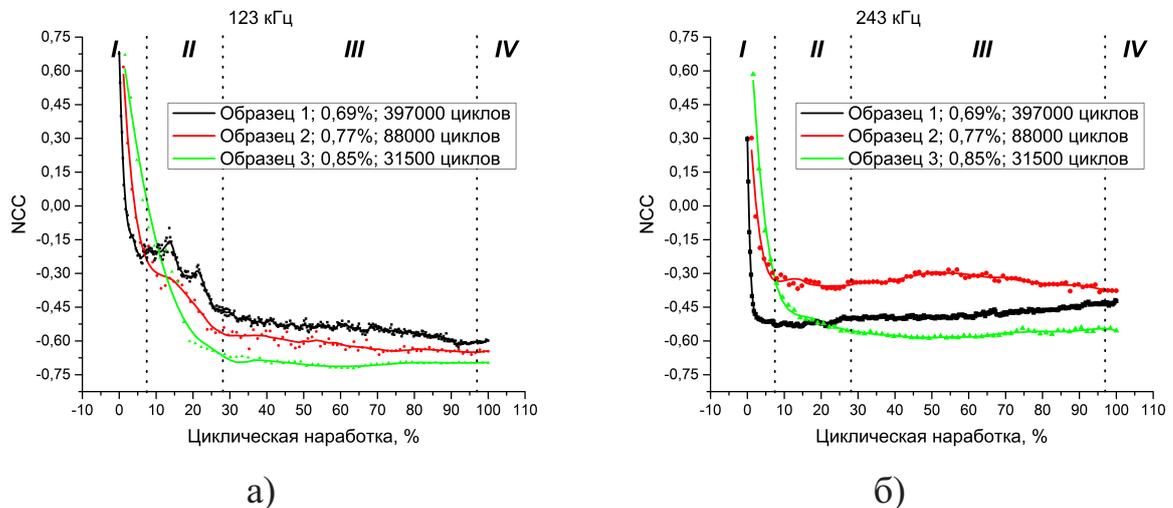


Рисунок 4.7 — Зависимость нормированного коэффициента корреляции двух сигналов (опорного и текущего) от величины наработки для трех образцов.

Частота зондирующего акустического сигнала (а) —  $f=123$  кГц и (б) —  $f=243$  кГц. В поле «легенды» для каждого образца указаны максимальная деформация в цикле и количество циклов до разрушения. Вертикальные пунктирные линии разделяют процесс разрушения на стадии, пронумерованные римскими цифрами.

Нормированный коэффициент корреляции, рассчитанный для сигналов на частоте  $f=123$  кГц, соответствует обозначенным стадиям и наглядно отображает переходы между ними. На частоте  $f=243$  кГц параметр имеет высокую чувствительность только на начальном этапе разрушения, на котором его значения быстро достигают минимума и в дальнейшем никак не изменяются вплоть до разрушения, что делает неэффективным его использование на протяжении всего испытания при заданных условиях.

Третий анализируемый параметр – второй момент разности двух сигналов или дисперсия, графики которой представлены на рисунке 4.8. На частоте  $f=123$  кГц (рисунок 4.8а) зависимости имеют три хорошо выявляемые стадии: стадия быстрого возрастания, затем стадия падения (для образца 2) или падения, а затем роста (для образцов 1 и 3) и потом участок медленного увеличения значений. Четвертая стадия наглядно проявляется у образца 1 в виде роста значений, у образцов 2 и 3 она выражена менее явно – незначительное снижение значений параметра.

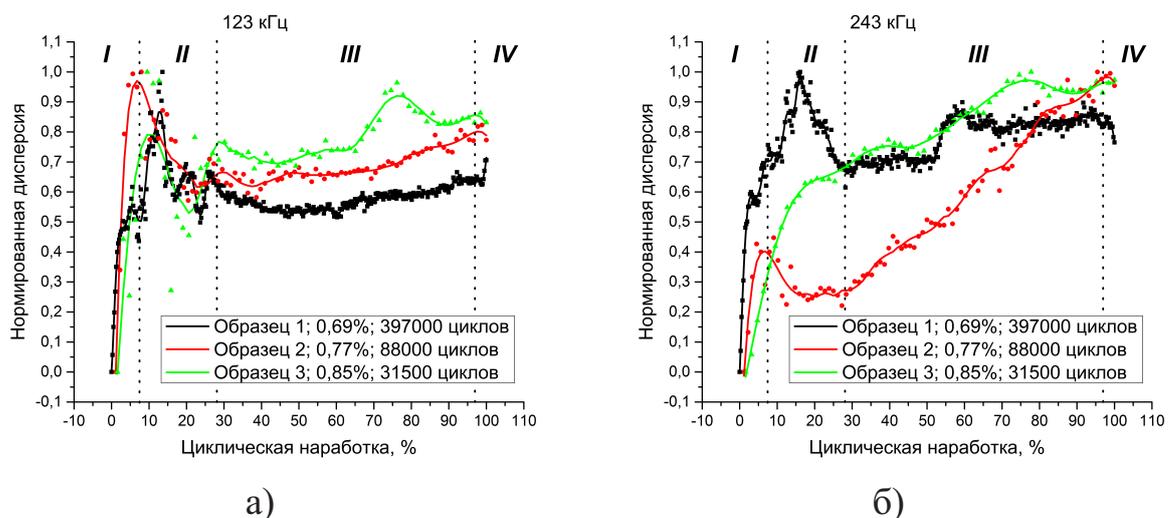


Рисунок 4.8 — Зависимость второго центрального момента разности двух сигналов (базового и текущего) от величины наработки для трех образцов.

Частота зондирующего акустического сигнала (а) —  $f=123$  кГц и (б) —  $f=243$  кГц. В поле «легенды» для каждого образца указаны максимальная деформация в цикле в начале испытания и количество циклов до разрушения. Вертикальные пунктирные линии разделяют процесс разрушения на стадии, пронумерованные римскими цифрами.

Графики дисперсии при контроле волнами Лэмба на высокой частоте  $f=243$  кГц (рисунок 4.8б) отличаются друг от друга для всех трех образцов, однако стадийность процессов разрушения сохраняется. Необходимо отметить

следующие основные характерные особенности: в начале испытания у всех трех образцов наблюдается рост значений, а перед разрушением (на четвертой стадии) — снижение. Стадия II наиболее четко выражена только у образца 2, тогда как у образца 3 она отсутствует, а у образца 1 происходит сначала рост, а потом уменьшение значений. Кроме того, у данного у образца 1 на третьей стадии присутствует скачок значений, который имел место и для максимума огибающей, но отсутствовал на графиках НСС.

В целом поведение зависимостей дисперсии от величины наработки имеет стадийный характер соответствующий выявленным ранее этапам и при этом является чувствительным к изменениям не только на стадии 1 и 2, но и демонстрирует видимый рост на стадии 3 на обеих частотах, что слабо наблюдалось у двух других параметров. Вид кривой для образца 1, также как и при анализе максимума огибающей, свидетельствует о выявляемых ультразвуковым контролем процессов разрушения: на стадии II, где значения меняются нестабильно, так и на стадии III, где на кривой наблюдается «ступенька».

#### **4.1.4 Интерпретация результатов тестирования с позиции механики разрушения**

Стадийность, наблюдаемая в изменении рассчитываемых информативных параметров, полученных от датчика перемещения (податливость), после обработки оптических изображений (энтропия Шеннона, MSE) и акустических сигналов (максимум огибающей, НСС и дисперсия) является следствием стадийности процесса разрушения композиционного материала. В данном разделе приводится обобщенная интерпретация полученных зависимостей и связь наблюдаемых изменений с физическими процессами разрушения, протекающими в материале с точки зрения механики усталостного разрушения.

*Первая стадия* характеризуется интенсивными процессами растрескивания матрицы композита и началом постепенного вовлечением армирующих волокон в процессы деформирования. Факт растрескивания хорошо демонстрируется при описании результатов оптического контроля увеличением MSE и энтропии Шеннона на стадии I. Основные изменения во внешнем виде образца связаны именно с появлением трещин. Акустический сигнал, в этом случае предсказуемо снижает амплитуду, так как на пути его распространения появляется большое число дефектов, существенно увеличивая коэффициент затухания

колебаний. Общее существенное снижение амплитуды принимаемого сигнала и является следствием резкого изменения всех расчётных параметров.

Кроме того, данный композит был изготовлен методом послойной укладки волокна с последующим прессованием при повышенном давлении и температуре. Армирующие волокна в этом случае предварительно не натягивались, следовательно, часть из них находится в сжатом состоянии после остывания или может быть уложено волнами. Растрескивание матрицы ведет к снижению адгезии на границе волокно-матрица и вытягиванию волокон под нагрузкой. Тем самым волокна начинают в большей степени вовлекаться в процесс деформирования, а вытяжка волокон ведет к увеличению удлинения образца, что и наблюдается датчиком перемещений.

*На второй стадии* продолжаются процессы растрескивания и дальнейшая вытяжка волокон, что видно по росту податливости образца (вытягивание волокон), а также по возрастанию параметров, полученных при обработке оптических изображений образцов (растрескивание), однако, энтропия Шеннона данные процессы регистрирует уже с меньшей чувствительностью. Кроме этого, интенсивное растрескивание начинает на данном этапе приводить к появлению расслоений, которые являются дефектами большего масштаба, чем трещины в матрице.

Появление расслоений с достаточно развитой поверхностью ведет к изменению параметров при прохождении сигнала, а особенно к отражению волновых пакетов от их границ. Это изменяет характер формирующегося в образце интерференционного паттерна и может приводить как к увеличению амплитуды сигнала, так и его уменьшению, вызывая тем самым нестабильное поведение этого и других параметров на второй стадии. Но это происходит не в первом волновом пакете, амплитуда которого по-прежнему снижается, а в «хвостовой части» сигнала, которая и состоит из накрадывающихся друг на друга отражений.

Если для образца, испытываемого при большой нагрузке, формирование расслоения достаточно быстро приводит к его стабильному развитию, как доминирующего «магистрального» дефекта, то при более низких нагрузках в цикле происходит формирование нескольких растущих расслоений, пока не произойдет перераспределение напряжений и их локализации в области одного из них. Как следствие — большая нестабильность параметров принимаемого сигнала у образца 1.

Влияние расслоений на внешний вид образца несущественно при наличии большого числа уже появившихся трещин, поэтому средствами оптического метода этот процесс выявляется слабо.

*На третьей стадии* процесс локализации осуществлен, и процессы разрушения в объеме образца завершаются. Расслоение на этом этапе либо не растет, аккумулируя микроразрушения, либо распространяется очень медленно. Таким образом, рассчитанные параметры для оптических и акустических данных не изменяются, либо изменяются менее значительно, но волокна, как и прежде, продолжают вытягиваться не вследствие потери адгезии на границе волокно-матрица, а вследствие удлинения самого волокна под воздействием прикладываемой нагрузки. Резкое изменение параметров сигнала для образца 1 на 50–60% наработки, предположительно вызвано скачкообразным ростом размера расслоения.

Финальная *четвертая стадия* отчетливо проявляется только на образце 1, так как прикладываемая нагрузка в цикле недостаточно велика и увеличивающееся расслоение, а также разрывы отдельных волокон приводят к снижению предела прочности ниже прикладываемых в цикле нагрузок не сразу. Для образцов 2 и 3 этот процесс происходит существенно быстрее и практически не проявляется на графиках информативных параметров.

#### 4.1.5 Заключение по разделу 4.1

Результаты проведенного анализа данных циклических испытаний стеклопластикового композита при контроле его состояния при помощи комбинированного оптического и акустического методов, а также тензометрии показывают, что предлагаемый комбинированный подход и разработанный ИМК позволяет выявлять основные стадии накопления повреждений: растрескивание матрицы, формированием расслоений, их последующий рост и финальное разрушение.

Акустический контроль позволяет выявлять переходы от одной стадии к другой, в некоторых случаях даже раньше, чем это начинает оказывать заметное влияние на макро характеристику деформирования – данные податливости образца. Например, это проявляется в виде несоответствия момента окончания первой стадии для кривой максимального значения огибающей для образца 1. Предложенный метод акустического контроля и обработки получаемых сигналов существенно зависит от изменения интерференционного паттерна образца по мере появления дефектов. С одной стороны, это увеличивает чувствительность

подхода к наличию изменений как таковых, а с другой отрицательно сказывается на классификации наблюдаемых процессов, их локации и нестабильность получаемых значений. Данный вопрос может быть решен несколькими путями: выделением только первого волнового пакета и его анализ отдельно от хвостовой части сигнала, детальным моделированием процессов распространения сигнала, например, методом конечных элементов, с последующим анализом результатов и классификацией дефектов с применением нейронных сетей.

Развитый оптический метод позволяет выявлять окончание первой стадии и переход ко второй, а также завершение второй стадии, но уже с существенно меньшей чувствительностью. Дальнейшие процессы разрушения нельзя количественно выявить и охарактеризовать путем анализа оптических изображений по предложенной методике. Ценность регистрации изображений также состоит в том, что исследователю имеет возможность визуально регистрировать и интерпретировать характерные особенности разрушения и, тем самым, при необходимости дополнительно интерпретировать результаты ультразвукового контроля.

Выявление оптимального момента остановки испытания требует дополнительных исследований и построения модели разрушения материала, чтобы с большей достоверностью предсказывать его поведение. На данный момент потенциально успешными информативными параметрами, на которых может базироваться такая модель, являются максимальное значение огибающей сигнала при контроле на частоте  $f=123$  кГц и нормированный коэффициент корреляции двух сигналов также на частоте  $f=123$  кГц. Они наиболее стабильно показали себя при мониторинге всех трех типов образцов: выраженные изменения на первой и второй стадии и горизонтальный участок на III-й стадии.

Результаты, полученные при оценке состояния образцов при циклическом нагружении позволяют в дальнейшем, на основе имеющихся подходов развивать мониторинг состояния лопастей уже введенных в эксплуатацию ветрогенераторов. Особенность конструкции ветрогенератора состоит в том, лопасть не является высоконагруженной, однако при вращении возникают существенные локальные изгибные напряжения в области крепления лопасти к ротору. Эта зона наиболее подвержена разрушению, но контроль её традиционными методами крайне затруднителен, так как она располагается на большой высоте и требует остановки и блокировки лопастей, что, тем не менее, сопряжено с риском для персонала. В то же время, несвоевременное обнаружение повреждения грозит

полным разрушением станции без возможности восстановления. Дальнейшая модернизация акустического метода мониторинга до уровня системы встроенного контроля (в рамках концепции SHM) позволит использовать его для оценки состояния лопастей работающих ветрогенераторов.

## **4.2 Разработка метода мониторинга состояния трехслойных углепластиковых композиционных материалов с сотовым заполнением при циклическом нагружении с использованием волн Лэмба**

### **4.2.1 Введение к разделу 4.2**

Одной из важных задач, поставленных в рамках НИР с ПАО «Компания Сухой» «ОКБ Сухого» по теме «Исследование возможности применения встроенных методов неразрушающего контроля для металлических и полимерных композиционных материалов», являлся мониторинг состояния углепластикового композиционного материала с алюминиевыми сотами в процессе циклического нагружения с использованием волн Лэмба. Ключевым аспектом в рамках выполнения НИР была необходимость продемонстрировать применимость ультразвукового контроля волнами Лэмба для характеристики процесса разрушения и деградации свойств подобного композиционного материала.

Цель исследований прикладных в данном разделе диссертации было: разработать методику для оценки поврежденности трехслойного углепластикового композиционного материала с алюминиевыми сотами при циклическом нагружении, с использованием ИМК, описанного выше в главе 2.

### **4.2.2 Методика проведения испытаний и оценки поврежденности**

Для оценки степени поврежденности углепластиковых трехслойных сэндвич-панелей применялся испытательно-мониторинговый комплекс (ИМК), разработанный в разделе 2.1. По результатам предварительных испытаний использование оптического контроля для решения поставленной задачи было признано неэффективным, так как поверхность образца изменяется незначительно, в материале развиваются лишь упругие деформации, а локализации деформаций вследствие появления дефектов практически не происходит (практически не выявляется при использовании DIC). Таким образом, оценка состояния материала может производиться лишь по данным акустического

мониторинга волнами Лэмба. С другой стороны, переработки алгоритма работы ИМК или его функциональной схемы не требовалось. Используемые аппаратные средства включали:

- сервогидравлическая испытательная машина Biss UTM 150 (для проведения циклических испытаний);
- цифровой осциллограф с функцией генератора Handyscope HS5-220 (для генерации и регистрации акустических сигналов) производилась с использованием;
- ПЭП AW1E12G-190EFL1Z (в качестве пары датчик-генератор).

Испытание на циклическое нагружение проводили на образцах трехслойных сэндвич панелей с алюминиевыми сотами в режиме контроля величины прикладываемой нагрузки. Внешние обшивки трехслойного композита имеет толщину 1,7 мм и укладку  $[(G90^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ/+45^\circ/0^\circ)S]$ , при этом укладка противоположной обшивки симметрична относительно сотового алюминиевого наполнителя. Общая толщина трехслойной сэндвич-панели составляет 18,2 мм.

Чертеж образца представлен на рисунке 4.9. Размером  $L=80$  мм обозначено расстояние между пьезоэлектрическими преобразователями, которые расположены симметрично по обе стороны относительно отверстия, диаметром  $d=6$  мм. На поверхность образца наклеивалась накладка шириной  $L=45$  мм.

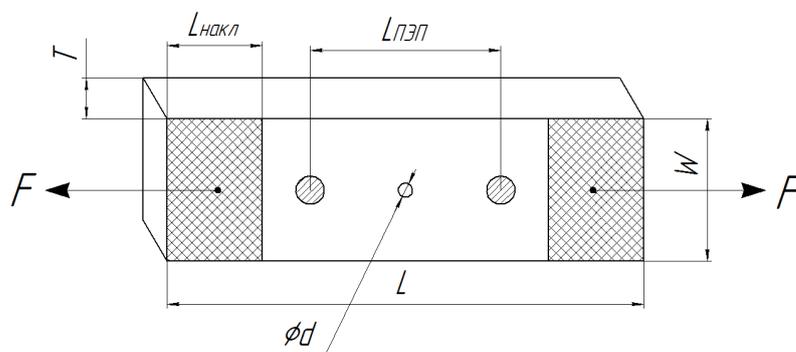


Рисунок 4.9 — Схема нагружения и размеры образца с сотовым заполнением.

Образцы трехслойной сэндвич-панели подвергали циклическому нагружению с частичным сжатием (асимметрия цикла  $R=-0,25$ ). Максимальная нагрузка при этом соответствовала  $0,9\sigma_b$  или  $P_{max}=60,5$  кН. Частота циклирования — 10 Гц. На начальном этапе регистрация акустических данных производилась каждые  $\Delta N=1\ 000$  циклов, а после  $\Delta N=10\ 000$  циклов периодичность регистрации акустических данных увеличивалась до  $\Delta N=5\ 000$  циклов.

По методике, описанной в разделе 2.1.6, были определена одна резонансная частота зондирующих акустических волн  $f=225$  кГц.

### 4.2.3 Результаты тестирования методики УЗ-мониторинга

По результатам проведенных тестовых испытаний анализируются зависимости информативных параметров (максимальное значение огибающей, коэффициент корреляции и дисперсия) и их первых производных в процессе циклического нагружения. График на рисунке 4.10а демонстрирует поведение трех параметров в зависимости от наработки в %, а графики на рисунках 4.10б, 4.11а, 4.11б служат для более детального анализа каждого параметра и его первой производной.

Как видно из представленных зависимостей (рисунок 4.10а) изменение каждого параметра имеет монотонный характер: значение огибающей (MaxEnv) и коэффициента корреляции (NCC) снижаются в процессе испытания, тогда как дисперсия ( $\mu_2$ ) возрастает. Процесс разрушения композиционного материала может быть разделен на этапы. В данном случае с целью проведения более детального анализа стадийности процесса разрушения, в отсутствие дополнительных источников информации (оптический мониторинг), была взята производная по каждому параметру, которая характеризует скорость его изменения.

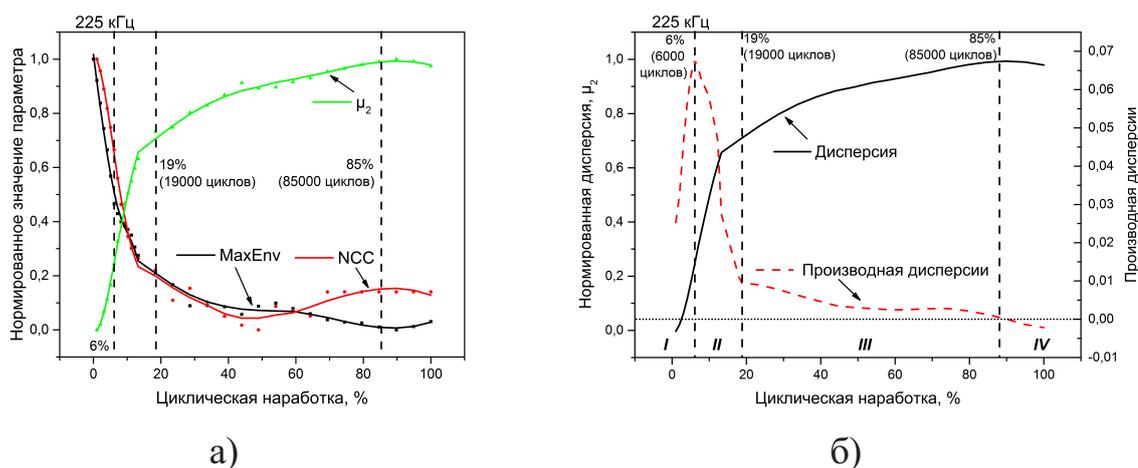


Рисунок 4.10 — (а) — График изменения дисперсии, максимального значения огибающей и коэффициента корреляции в процессе циклического нагружения; (б) — График изменения дисперсии ( $\mu_2$ ) разности двух сигналов и ее производной в зависимости от величины наработки.

График изменения дисперсии разности двух сигналов ( $\mu_2$ ) и ее производной представлены на рисунке 4.10б. Основываясь на внешнем виде исходной кривой и производной, были выделены 4 стадии изменения параметра, показанные на графиках вертикальными штриховыми линиями с указанием процента наработки и количества приложенных циклов:

Стадия 1 — от 0% до 6% (0–6 000 циклов). На данной стадии значение параметров быстро  $\text{MaxEnv}$  и  $\text{NCC}$  снижаются, а  $\mu_2$  — быстро возрастает.

Стадия 2 — от 6 до 19% (6 000–19 000 циклов). Данная стадия является переходной от быстрого изменения значений информативных параметров, наблюдаемого на первой стадии, к медленному, когда производная становится близкой к нулю.

Стадия 3 — от 19 до 85% (19 000–85 000 циклов). Характеризуется значением производной (для всех информативных параметров), стремящейся к нулю. Графики информативных параметров демонстрируют медленное снижение или возрастание.

Стадия 4 — от 85 до 100% (85 000–100 000 циклов). График производных информативных параметров пересекает ось  $Ox$  и значения производной меняют знак на противоположный. То есть исходные графики информативных параметров меняют начальный тренд — если график на стадиях 1–3 возрастал, то на 4-й убывает.

На графике двух других информативных параметров — нормированного коэффициента корреляции (рисунок 4.11а) и максимума огибающей (рисунок 4.11б) — также были выделены 4 стадии. Видно, что выявленные ранее стадии точно совпадают с экстремальными точками графика  $\text{NCC}$  и его производной, что дополнительно свидетельствует в пользу чувствительности выбранных параметров к развитию процессов разрушения. Поведение кривой  $\text{NCC}$  и производной противоположно поведению графика  $\mu_2$ : на первой стадии значения производной снижаются, затем быстро возрастают на второй и сохраняют практически постоянные значения на третьей. При переходе к четвертой стадии значения производных  $\text{NCC}$  и  $\text{MaxEnv}$  меняют знак на противоположный.

График максимального значения огибающей (рисунок 4.11б) также стабильно снижается на протяжении всего эксперимента, однако граница между первой и второй стадией в этом случае размыта, и график не демонстрирует существенных изменений в поведении кривых, что, по всей видимости, вызвано

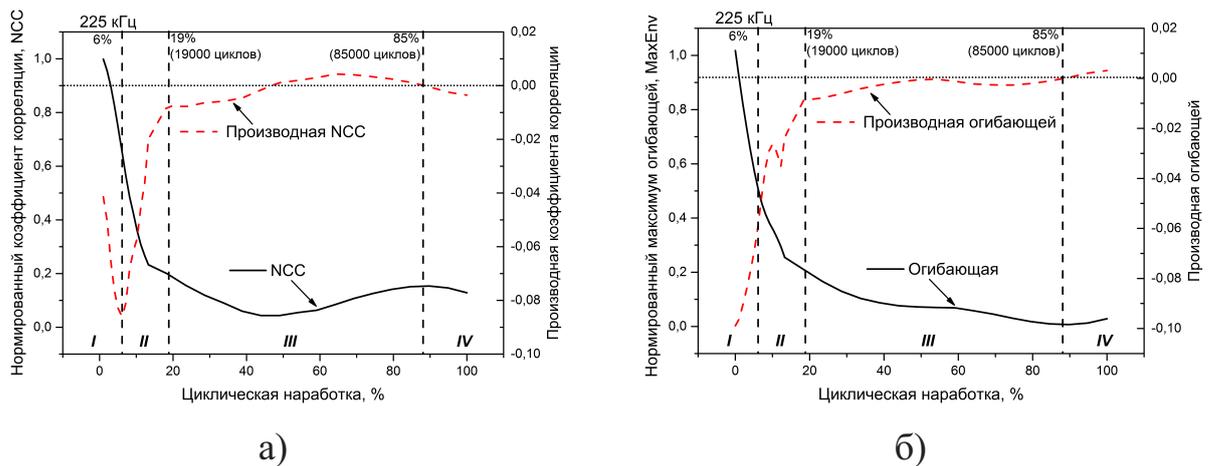


Рисунок 4.11 – Графики изменения (а) — коэффициента корреляции (NCC) и его производной в зависимости; (б) — максимального значения огибающей сигнала (MaxEnv) и ее производной от величины наработки.

нечувствительностью данного параметра к процессам разрушения, происходящим на данном этапе.

#### 4.2.4 Обсуждение полученных результатов

На первой стадии (до  $N \approx 5\%$  наработки) значение дисперсии быстро возрастает, а коэффициента корреляции снижается, достигая локальных экстремумом, что свидетельствует о значительном изменении общей формы акустического сигнала на первых этапах циклического нагружения. Такое поведение может быть вызвано проистекающими в начале процессами интенсивного разрушения, когда происходит первичное «приспособление» структуры материала к прикладываемым нагрузкам – вытягиваются волокна, происходит зарождение микротрещин. Все описанные процессы, как видно по результатам акустического контроля, существенно сказываются на изменении параметров акустического сигнала. Это же ведет и к снижению значений максимума огибающей сигнала (т.е. амплитуды сигнала).

На второй стадии (до  $N \approx 20\%$  наработки), судя по значениям производной, снижение NCC и  $\mu_2$  замедляется, чего не характерно для значений MaxEnv. Это объясняется чувствительностью коэффициента корреляции и дисперсии к общему изменению формы сигнала, то есть на первом этапе происходит появление повреждений во всем объеме композиционного материала, которое на втором этапе локализуется в области отверстия. Локальный рост дефекта не так

существенно влияет на общую форму сигнала, однако, обуславливает дальнейшее снижение его амплитуды, что и проявляется в виде малой чувствительности параметра  $\text{MaxEnv}$  к переходу процесса разрушения от стадии 1 к стадии 2.

Третья стадия (до  $N \approx 85\%$ ) является самой продолжительной. На этой стадии значения всех параметров приблизительно постоянны или изменяются медленно, а значения производных близки (стремятся) к нулю. Это означает, что основные процессы разрушения по всему объему образца уже завершились, произошла локализация повреждений в области отверстия, а рост локализованных расслоений происходит медленно или не происходит вовсе.

В какой-то момент величина растущего расслоения и отклеивание сот приближается к критическим значениям и процессы разрушения становятся более интенсивными, что обуславливает переход на четвертую стадию (до  $N \approx 100\%$  — разрушения) с последующим разрушением образца — преимущественно вследствие отклеивания сот и потери устойчивости углепластиковых слоев в области отверстия при сжатии.

#### 4.2.5 Заключение по разделу 4.2

По результатам тестирования было продемонстрировано, что предложенный метод ультразвукового мониторинга состояния может эффективно использоваться для оценки состояния трехслойных углепластиковых композитов с алюминиевыми сотами. При тестировании метода были выявлены 4 стадии процесса усталостного разрушения материала на основе рассчитываемых информативных параметров принимаемых акустических сигналов и их первых производных. Зависимости значений параметров и производных от величины циклической наработки демонстрируют стабильные результаты и в явном виде определяют переход разрушения от одного уровня (стадии) к другому, вызывая при этом изменения в поведении графиков.

С использованием предлагаемого метода оценки были выявлены процессы разрушения и соответствующее им поведение выбранных информативных параметров акустических сигналов:

- процессы интенсивного разрушения на первой стадии, когда материал «приспосабливается» к прикладываемой нагрузке, ведут к быстрому росту дисперсии ( $\mu_2$ ) и быстрому снижению NCC, тогда как значения  $\text{MaxEnv}$  снижаются;
- зарождение локализованных макродефектов на второй стадии сопровождается более медленным ростом  $\mu_2$  и медленным снижением NCC (переход

отображается на графиках производной в виде экстремума), тогда как MaxEnv малоэффективен для выявления процессов локализации повреждений;

– рост макродефектов на третьей стадии характеризуется наличием горизонтальных участков на графиках всех трех информативных параметров, а значения производной при этом близки к 0;

– интенсивное разрушение и ускоренный (лавинообразный) рост макроповреждения проявляется в виде перехода графика производных информативных параметров через ноль.

Перспектива дальнейшего развития акустического мониторинга состояния трехслойных углепластиковых композитов требует разработки алгоритмом машинного обучения для локализации повреждений и их классификации, а также масштабирования методики на конструкции большого размера, такие как обшивка самолета и пр.

### **4.3 Оптический метод контроля состояния наполненных композитов на основе СВМПЭ по упругому восстановлению при контактном циклическом нагружении**

#### **4.3.1 Введение к разделу 4.3**

В настоящее время активное освоение арктических регионов сдерживается недостаточным количеством конструкционных материалов, способных как обеспечивать, так и длительное время сохранять эксплуатационные характеристики в условиях низких климатических температур, а также их перепадов. Это в равной степени относится и к полимерным материалам, большинство из которых при температурах ниже  $-20/0^{\circ}\text{C}$  становятся хрупкими. Решение данной проблемы может быть достигнуто за счет применения термопластичных матриц, армированных упрочняющими волокнами, наполненных твердосмазочными наполнителями, а также модифицированных наноразмерными частицами/волокнами.

Несмотря на то, что сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) традиционно применяется в качестве антифрикционного материала, изучение его сопротивления воздействию циклических нагрузок представляет актуальную научно-техническую проблему. При этом циклическое нагружение может воздействовать на полимер как в качестве регулярно прикладываемых к детали (образцу) распределенных напряжений растяжения/сжатия, так и в виде

циклического контактного воздействия. Кроме того, для полимерных (композиционных) материалов одним из ключевых механизмов изнашивания является именно усталостный (наряду с адгезионным и микроабразивным). Таким образом, анализ деформационного поведения полимерных композитов на основе СВМПЭ в условиях циклического контактного нагружения требует развития новых подходов, в том числе с *in situ* регистрацией данных о развитии деформационных процессов. Это позволит на основе систематизации полученных данных, их обобщении с результатами структурных исследований и последующим построением компьютерных моделей развить научно обоснованный подход к проектированию изделий из них.

В рамках выполнения прикладных научных исследований по теме: «Разработка с использованием многоуровневых компьютерных моделей иерархически армированных гетеромодульных экструдированных твердосмазочных нанокомпозитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) для применения в узлах трения и футеровки деталей машин и механизмов, работающих в условиях Крайнего Севера» (Соглашение между Министерством науки и образования РФ и ИФПМ СО РАН №14.604.21.015 в ИФПМ СО РАН проводили исследования по разработке и аттестации структуры, свойств и деформационного поведения полимерных композитов на основе СВМПЭ.

#### **4.3.2 Результаты испытаний на контактное циклическое воздействие в полимерных композитах на основе СВМПЭ**

В рамках предварительных исследований было выявлено, что при проведении испытаний на контактное циклическое воздействие в полимерных композитах на основе СВМПЭ развивается эффект упругого восстановления, проявляющийся в том, что материал под местом воздействия металлического контртела частично восстанавливает свою форму, причем величина такого упругого восстановления может достигать 60%. Указанный эффект был зафиксирован с помощью контактного профилометра, и было показано, что за время 24 часа с момента окончания нагружения материал в зоне приложения контактного давления (дорожка трения) все еще уменьшает объем (рисунок 4.12а). С другой стороны, варьирование параметров циклического контактного нагружения (скорости скольжения, прикладываемой нагрузки) показало, что величина упругого восстановления в значительной степени изменяется. Кроме того, варьирование

состава (и соответственно) структуры полимерных композитов на основе СВМПЭ путем введения армирующих наполнителей (микрочастиц и микроволокон), пластифицирующих компонентов (полимеров с высоким показателем текучести расплава), твердосмазочных частиц (ПТФЭ и др.), также существенно влияет на данный показатель (Рисунок 4.12б).

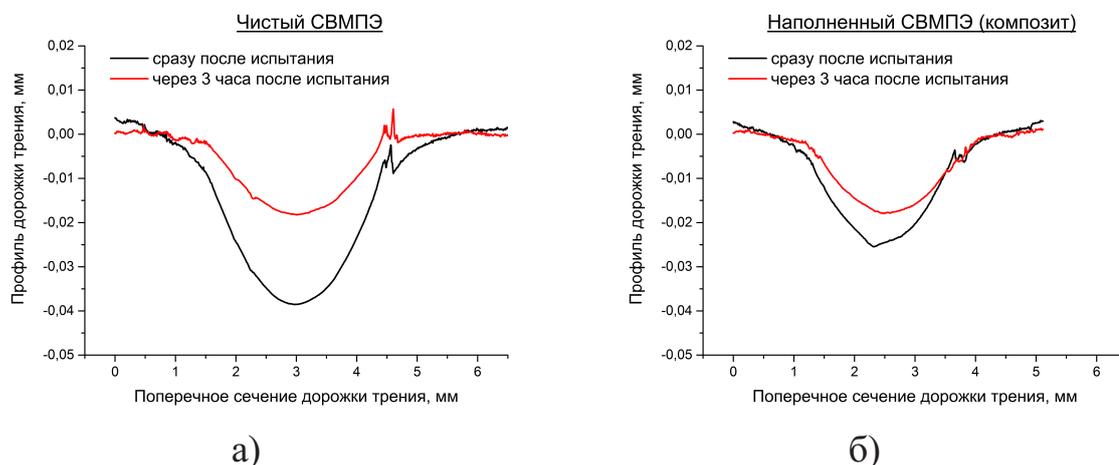


Рисунок 4.12 — (а) — Профиль дорожки трения в образце чистого СВМПЭ (а) и композите «СВМПЭ + 10 вес%ПЭНД-прив-МАГ + 2 вес.% РУВ + 0.5 вес.% УНВ» (б) через 180 минут после окончания циклического контактного нагружения.

Таким образом, упругое восстановление может быть использовано в качестве процесса, параметры которого способны как характеризовать текущее механическое состояние полимерного композита (в предположении, например, о деградации его свойств в процессе длительной эксплуатации), так и позволяющего прогнозировать сопротивление приложению циклического контактного нагружения при разработке новых композиций, либо оптимизации их состава и режимов изготовления. В качестве информативных параметров при этом могут быть использованы: величина перемещения (собственно пропорциональная упругому восстановлению объема дорожки трения), а также величины деформации, вызванной данным процессом. Выражения для их расчета приведены в разделе 2.1.5 диссертационной работы.

Для проведения таких исследований было предложено использовать оптический метод оценки перемещений и деформаций, основанный на корреляции цифровых изображений, а регистрацию процесса упругого восстановления проводить на поверхности боковой грани образцов сразу после завершения циклического контактного нагружения в течение заданного времени. В качестве

оборудования для регистрации изображений поверхности полимерных композитов на основе СВМПЭ был использован оптический комплекс, разработанный в Главе 3 диссертационной работы. До начала испытаний на боковую грань образцов размером  $10 \times 10 \times 16$  мм с помощью аэрографа и краски белого и черного цветов наносился спекл с целью придания отражающей способности полимеру, а также повышения контраста на изображениях. В рамках предварительных исследований, проводившихся с помощью контактного профилометра, было выявлено, что в процессе упругого восстановления максимальная величина перемещений составляет десятки микрометров. С учетом данного результата было подобрано увеличение оптического микроскопа, таким образом, что размер области наблюдения составляла  $885 \times 740$  мкм.

Параметры циклического контактного нагружения также варьировали. Скорость скольжения контртела при этом составляла 0,3 и 0,5 м/с, а нагрузка 60 и 140 Н. Конечной целью исследований было установление корреляции между величиной упругого восстановления образца в терминах перемещений и деформаций, его модулем упругости и сопротивлением полимерного материала воздействию циклического контактного нагружения. Известно, что СВМПЭ является полукристаллическим термопластичным полимером, обладающим фибриллярным строением и высокой молекулярной массой (более 1 млн. углеродных единиц). По этой причине он эффективно демпфирует упругие колебания и обладает высокой стойкостью к изнашиванию, в том числе абразивному. Также это определяет его высокую эластичность. Таким образом, сохранение способности к упругому восстановлению при циклическом контактом нагружении, а также кинетика данного процесса, являются важными критериями сохранения высоких демпфирующих свойств при разработке методов структурной модификации.

Однако, несмотря на все указанные выше преимущества, чистый СВМПЭ обладает недостаточно высокой прочностью, низкой технологичностью и, все-таки, недостаточно высокой износостойкостью. В рамках выполнявшегося проекта была оставлена задача обеспечить повышение комплекса характеристик путем введения армирующих углеродных волокон, «твердосмазочных» углеродных нанотрубок, полимерного пластификатора в виде частиц полиэтилена, привитого малеиновым ангидридом. Последний компонент дополнительно обеспечивал повышение межфазной адгезии. Указанное многоэлементное наполнение исходной полимерной матрицы вызывало разнонаправленное влияние

на структуру и свойства, которые оценивали при испытаниях на износ, включая закрепленными абразивными частицами, твердость по Шору Д, плотность, одноосное растяжение, ударную вязкость. В рамках данного диссертационного исследования приведены результаты оценки упругого восстановления в терминах величины перемещений и деформаций для двух материалов: исходный СВМПЭ и композит состава «СВМПЭ+10 вес%ПЭНД-прив-МАГ+2 вес.% РУВ+0.5 вес.% УНВ» (где ПЭНД - полиэтилен низкого давления; МАГ - малеиновый ангидрид; РУВ – рубленые углеродные волокна; УНВ – углеродные нановолокна). Циклическое контактное нагружение проводили при частоте вращения стального контртела 100 оборотов в минуту (скорости скольжения 0,3 м/с) и нагрузке 140 Н (согласно оценочным расчетам удельное давление при этом достигало 15 МПа, что на 3-4 МПа ниже предела текучести ненаполненного СВМПЭ).

На рисунке 4.13 приведены результаты измерений перемещений и компонент деформаций ( $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ ) для образцов чистого СВМПЭ и композита на его основе. Показано, что в образце чистого СВМПЭ за время порядка 3 часов перемещение, вызванное упругим восстановлением, составило  $\approx 40$  мкм. При этом 50% от этой величины приходится на первые  $t=20$  минут после окончания нагружения. В композите «СВМПЭ+10 вес%ПЭНД-прив-МАГ+2 вес.% РУВ+0.5 вес.% УНВ» за то же время величина перемещения увеличилась в два раза меньше, однако характер их изменения следует считать подобным.

Поля горизонтальной компоненты перемещений  $U$  в процессе упругого восстановления для образцов чистого СВМПЭ и многокомпонентного композита на его основе приведены на рисунке 4.14. Цветовое кодирование величин перемещений для каждого поля приведено рядом для каждого из распределений. Показано, что в ненаполненном СВМПЭ характер перемещений за все время практически не меняется: максимальная величина параметра  $U$  фиксируется в центре дорожки трения, радиально уменьшаясь по мере удаления от него. Это, в том числе, подтверждает упругий характер наблюдаемых процессов. Характер изменения компонент деформации  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  в целом подобен таковому для временной зависимости величины перемещения: за время наблюдения 150 минут (2,5 часа) их величина возросла от нуля до 0.6

В случае упругого восстановления композита характер изменения величины перемещения  $U$  и компонент деформации  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  также подобен (за исключением того, что  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  меняются инверсным образом). Тем не менее,

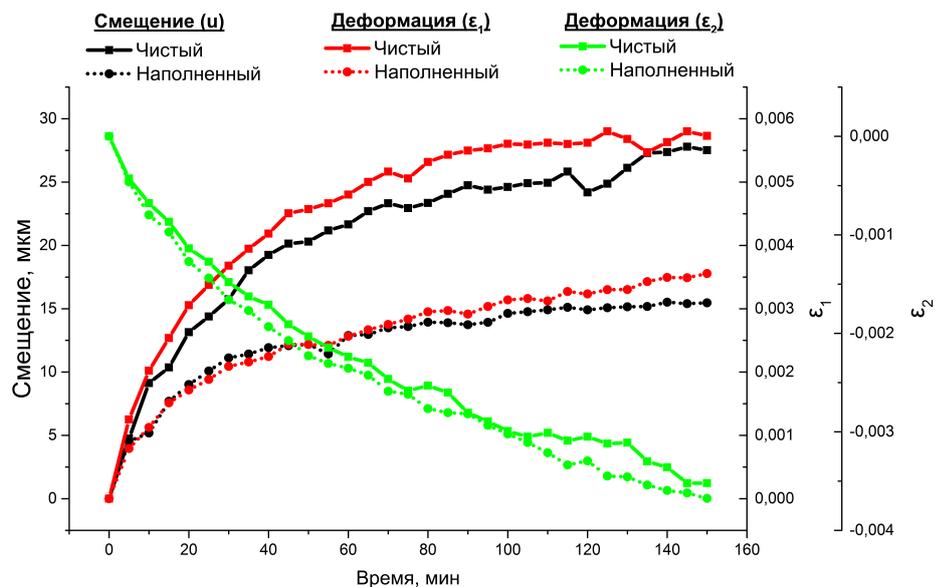


Рисунок 4.13 — Временные зависимости величины перемещения и главных деформаций  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  в процессе упругого восстановления: чистый СВМПЭ (сплошные линии с квадратными маркерами), композиция «СВМПЭ+10 вес.%ПЭНД-прив-МАГ+2 вес.% РУВ+0.5 вес.% УНВ» (пунктирные линии с круглыми маркерами).

в рамках применения предложенного подхода наглядно показано, что изменение структуры и механических свойств полимерных композитов на основе СВМПЭ наглядно проявляется в варьировании выбранных для анализа информативных параметров.

С позиции интерпретации полученных данных и их последующего практического использования необходимым отметить следующее. Упругое восстановление по природе своей связано, как и следует из определения, с упругими свойствами материала. Для этого традиционно анализируют модуль упругости. Данные по ряду физико-механических свойств чистого СВМПЭ и композита «СВМПЭ + 10 вес.%ПЭНД-прив-МАГ + 2 вес.% РУВ + 0.5 вес.% УНВ» приведены в Таблице 4.3 и Таблице 4.4. Видно, что модуль упругости полимерного композита на основе многокомпонентной смеси существенно выше. Однако данный параметр не чувствителен в условиях циклического контактного воздействия, в то время как было показано, что варьирование скорости скольжения и нагрузки сопровождается изменением величины упругого восстановления более чем 5 раз. На основании этих данных можно констатировать, что предложенный подход позволяет количественно оценивать состояние материала, включая

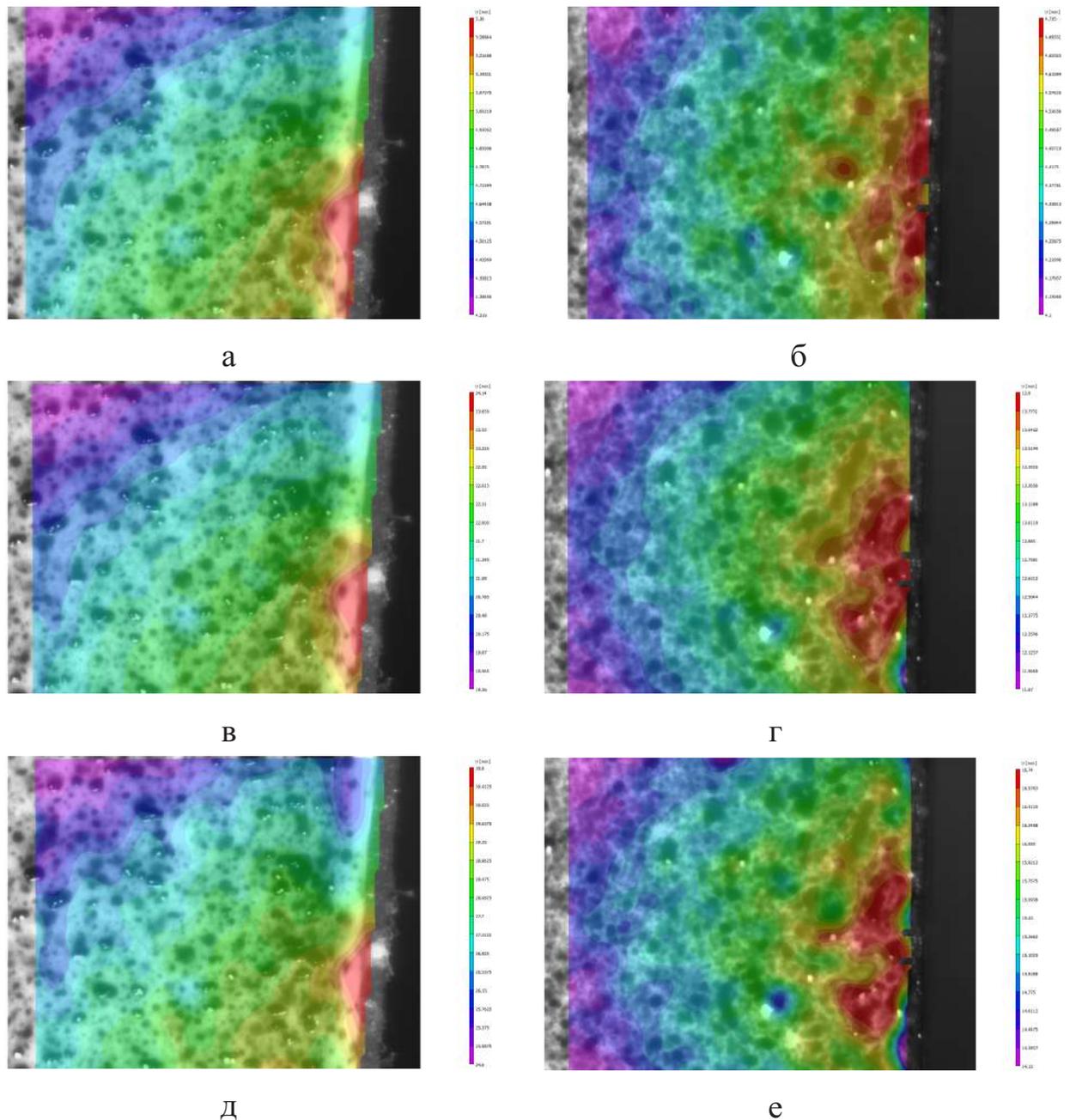


Рисунок 4.14 — Поля горизонтальной компоненты перемещений  $U$  в процессе упругого восстановления образцов чистого СВМПЭ; время после окончания циклического контактного нагружения: (а),(б) — 5 мин.; (в),(г) — 1 час.; (д),(е) — 2,5 часа.

сопротивление циклическому контактному воздействию при варьировании параметров нагружения в широком интервале значений.

### 4.3.3 Заключение по разделу 4.3

Таким образом, в разделе предложена и на основе разработанного в Главе 3 аппаратно-программного комплекса реализована методика контроля состояния

Таблица 4.3 — Сводные данные о ключевых физико-механических свойствах чистого СВМПЭ и многокомпонентного композита на его основе.

Состав	Модуль упругости, МПа	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Твердость по Шору (Д)	Предел текучести, МПа
СВМПЭ	711±40	0,928	57,7±0,6	21,6±0,6
Композит	1171±123	0,954	60,5±0,3	29,1±0,9

Таблица 4.4 — Сводные данные о свойствах чистого СВМПЭ и многокомпонентного композита на его основе при испытании на циклическое контактное нагружение.

Состав	Объемный износ, мм <sup>3</sup>	Объем		Восстановление, %
		дорожки после 3 ч, мм <sup>3</sup>	Восстановление, мм <sup>3</sup>	
СВМПЭ	0,340±0,057	0,169±0,064	0,171	50,3
Композит	0,191±0,039	0,134±0,023	0,057	29,8

полимерных композитов на основе СВМПЭ. В ее основе лежит расчет информативных параметров, характеризующих упругое восстановление образцов после циклического контактного воздействия. На примере сопоставления временных зависимостей величин перемещения и компонент деформации показано, что предложенные для анализа информативные параметры позволяют количественно (в величинах смещений и деформаций) и качественно (в виде полей) охарактеризовать процесс упругого восстановления для образцов чистого СВМПЭ и многокомпонентного композита на его основе.

Следует отметить, что приложение статического контактного давления не может являться приемлемым методом контроля наполненных полимерных композитов на основе СВМПЭ. Это вызвано тем, что в этом случае а) дорожка трения не формируется, поэтому давление распределяется на значительно

большую площадь, кратно уменьшая величину обратимой упругой деформации; б) приложение циклической контактной нагрузки сопровождается нагревом контртела, вызывающим локальный нагрев полимерного образца, что отражается как на повышении интенсивности изнашивания (что уменьшает объем материала, испытывающего упругое восстановление), так и способно за счет пластификации уменьшать механические свойства. По совокупности этих причин предложенный в работе подход к оценке состояния полимерных композитов на основе СВМПЭ является оригинальным и в дальнейшем может быть использован в качестве метода, основанного на контроле миниатюрных образцов-проб, вырезанных из эксплуатируемых изделий.

#### **4.4 Разработка метода количественной оценки усталостного разрушения в сварных соединениях сплава ВТ-23 в исходном состоянии и после обработки**

Важной практической задачей в области создания сложных конструкций является вопрос сопряжения отдельных их элементов, который реализуется в виде разъемных или неразъемных соединений. Во многих случаях технологически выгоднее создавать неразъемные соединения с применением различных видов сварки, однако это не всегда возможно и зависит от типа свариваемых материалов и технологии их соединения. Одним из перспективных технологий сварки является лазерная сварка, которая обладает рядом существенных преимуществ, таких как высокий КПД, широкие возможности для автоматизации, бесконтактность и высокие скорости сварки.

Одной из задач совершенствования метода лазерной сварки является выработка условий формирования соединений высокопрочных титановых сплавов. На данный момент сварные соединения титановых сплавов имеют высокую хрупкость и низкое сопротивление росту трещины при циклическом нагружении, что особенно важно в конструкциях ответственного назначения для авиационной промышленности. Предлагаемый в лаборатории физической мезомеханики и неразрушающих методов контроля ИФПМ СО РАН подход к повышению механических (в частности усталостных) свойств сварных соединений титанового сплава ВТ-23, состоит в обработке шва комбинированной ультразвуковой механической ковкой (УЗМК).

Задача, поставленная в рамках проведения поисковых исследований, проводившихся в интересах Всероссийского института авиационных материалов, а

также совместно с ИТПМ СО РАН, заключалась в разработке метода количественной оценки процесса усталостного разрушения сварных швов титанового сплава ВТ-23 в двух состояниях: без дополнительной обработки и после комбинированной ультразвуковой механическойковки (УЗМК).

#### 4.4.1 Описание методики проведения усталостных испытаний

Для качественной и количественной оценки процессов усталостного разрушения образцов ВТ-23 со сварными соединениями было предложено использовать комбинацию двух методов: (1) метод корреляции цифровых изображений, позволяющий проследить распространение трещины в процессе испытания и (2) фрактографический анализ на растровом электронном микроскопе (РЭМ), с помощью которого можно более детально изучить разрушение на микромасштабе.

Использование РЭМ-фрактографии при анализе процессов разрушения, позволит получить вид разрушения (хрупкий/вязкий), место зарождения трещины, площади областей усталостного роста трещины и долома, структурные данные о поверхности излома и др. Использование методики перегрузок-разгрузок, как это было продемонстрировано в разделе 3.2, для получения маркеров на поверхности излома и управления ростом трещины, во-первых, не дает выраженных полос в связи с сильной неоднородной структурой соединения и его высокой хрупкостью, а, во-вторых, испытание невозможно считать выполненным по стандарту (ГОСТ 25.502-79 или ASTM E466-15), что является обязательным требованием.

Использование метода корреляции цифровых изображений для оценки усталостного разрушения основано на применении ЛИДК разработанного в разделе 3.3. Однако, его эффективность ограничена, в связи с особенностью разрушения неоднородных сварных соединений. Зарождение трещины в этом случае возможно, как на поверхности, так и объеме материала и невозможностью прогнозирования с какой стороны плоского образца она выйдет на поверхность, чтобы детально за ней наблюдать. Поэтому необходимо производить фотографирование испытываемого образца с двух сторон. Для этой цели ЛИДК был дополнен цифровой фотокамерой Canon EOS 700D, оснащенной объективом Canon EF 70-300 mm 4-5.6L, а также соответствующими программами

для реализации управления камерой, процессом съемки и записи данных. Таким образом, используемый комплекс включал в себя следующие аппаратные средства:

- Циклические испытания осуществлялись на сервогидравлической испытательной машине Biss UTM 150;
- Фотографирование одной поверхности образца выполнялось на цифровую фотокамеру Canon EOS 700D, оснащенную объективом Canon EF 70-300 mm 4-5.6L;
- Фотографирование второй поверхности образца выполнялось на цифровую камеру Basler piA2400-17gc совмещенную с моновидеомикроскопом Альтами MB0670Д. Увеличение выбрано таким образом, чтобы ширина кадра соответствовала ширине образца, таким образом отпадает необходимость поиска трещины и перемещения оптической системы.

Циклическое нагружение производилось при следующих параметрах:  $P_{max}=9$  кН (что составляет 500 МПа или  $0,45\sigma_b$ ) и асимметрии  $R=0,1$ . Фотографирование образца осуществлялось с двух сторон каждые  $\Delta N=500$  циклов при удержании максимальной нагрузки в цикле, а масштаб увеличения при фотографировании составлял 5 мкм/пиксел.

Используемая форма и размеры образцов представлены на рисунке 4.15.

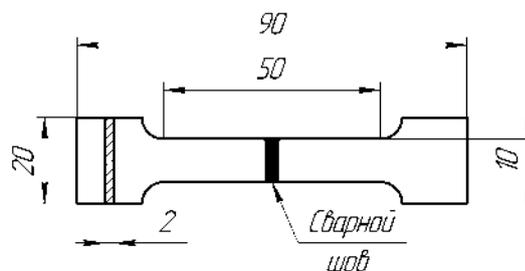


Рисунок 4.15 — Геометрические размеры образца сплава ВТ-23 со сварным соединением для испытаний на малоцикловую усталость.

Сварное соединение формировали при помощи лазерной сварки в защитной атмосфере аргона. Тестовым испытаниям подвергали образцы со сварным соединением в исходном состоянии (без дополнительной обработки) и образцы после комбинированной ультразвуковой механическойковки (УЗМК).

#### 4.4.2 Результаты испытаний и обработки изображений

По результатам анализа полученных изображений проведена оценка длины трещины, выходящей на поверхность образца, и скорости её распространения

(рисунок 4.16). Из представленного графика видно существенное отличие между двумя материалами. Время появления трещины для материала без УЗМК составляет 82% ( $N=14\,000$  циклов) от общего количества циклов до разрушения, тогда как после обработки это значение повышается до 84% ( $N=27\,500$  циклов). Скорость распространения трещины в материале без УЗМК немного выше, чем для материала подвергнутого комбинированной обработке: в первом случае разрушения наступает через 3 500 циклов после появления трещины, а во втором через 5 500 циклов.

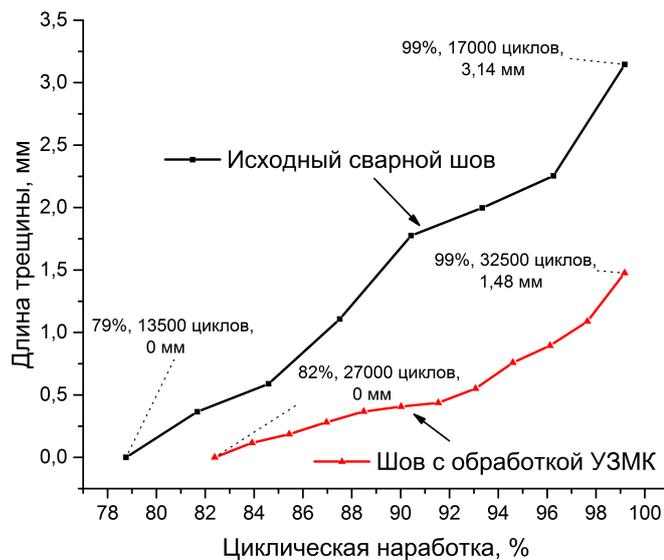


Рисунок 4.16 — Зависимость длины трещины от нормированного количества циклов до разрушения.

На рисунке 4.17 представлены поля главных деформаций  $\varepsilon_1$  для двух образцов перед разрушением. Так как фотографирование производили с двух сторон на разные камеры, то внешний вид исходных изображений немного отличается. Кроме того, трещины в образцах зародились в разных местах, и вышли на поверхность для исходного образца со стороны корня сварного шва, а для обработанного образца с лицевой.

Признаки зарождения трещины, проявляющиеся в локальном повышении величины продольной деформации  $\varepsilon_1$ , для образца без обработки, выявляются уже при  $N=11\,000$  циклах, а для образца подвергнутого УЗМК — при  $N=12\,000$  циклов.

Для численной характеристики деформационного поведения образца на изображении выделялась квадратная область равная ширине образца. По данной области происходило осреднение значений главных деформаций, результаты такой оценки представлены в виде графиков на рисунке 4.18.

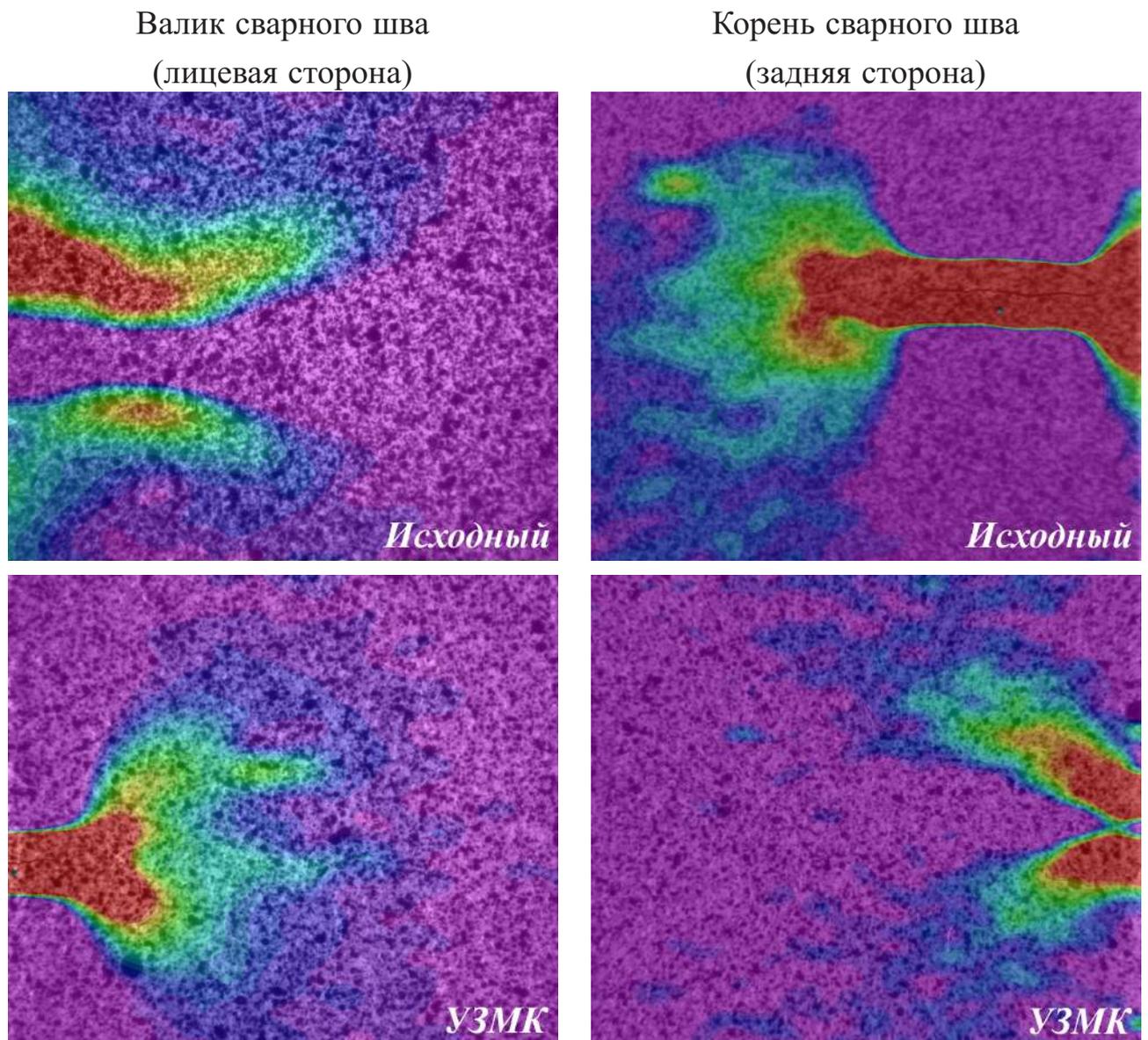


Рисунок 4.17 — Поля главных деформаций  $\varepsilon_1$  для исходного образца и после обработки УЗМК, полученные с лицевой стороны (валик сварного шва) и с задней стороны (корень сварного шва) перед разрушением.

Из полученных зависимостей видно, что уровень деформации на протяжении практически всего испытания сохраняет практически постоянный уровень, однако, этот уровень зависит от типа образца, а также от стороны образца. Примечателен тот факт, что средний уровень деформаций ниже с той стороны, где трещина зарождается раньше.

Появление трещины в исходном образце на величине наработки примерно 80% приводит к резкому возрастанию среднего уровня деформаций  $\varepsilon_1$  на обеих сторонах образца и снижению  $\varepsilon_2$ . Обработанный образец обладает меньшей чувствительностью к появлению трещины, что отражается на графиках только по достижению 90% в виде относительно небольшого возрастания деформаций.

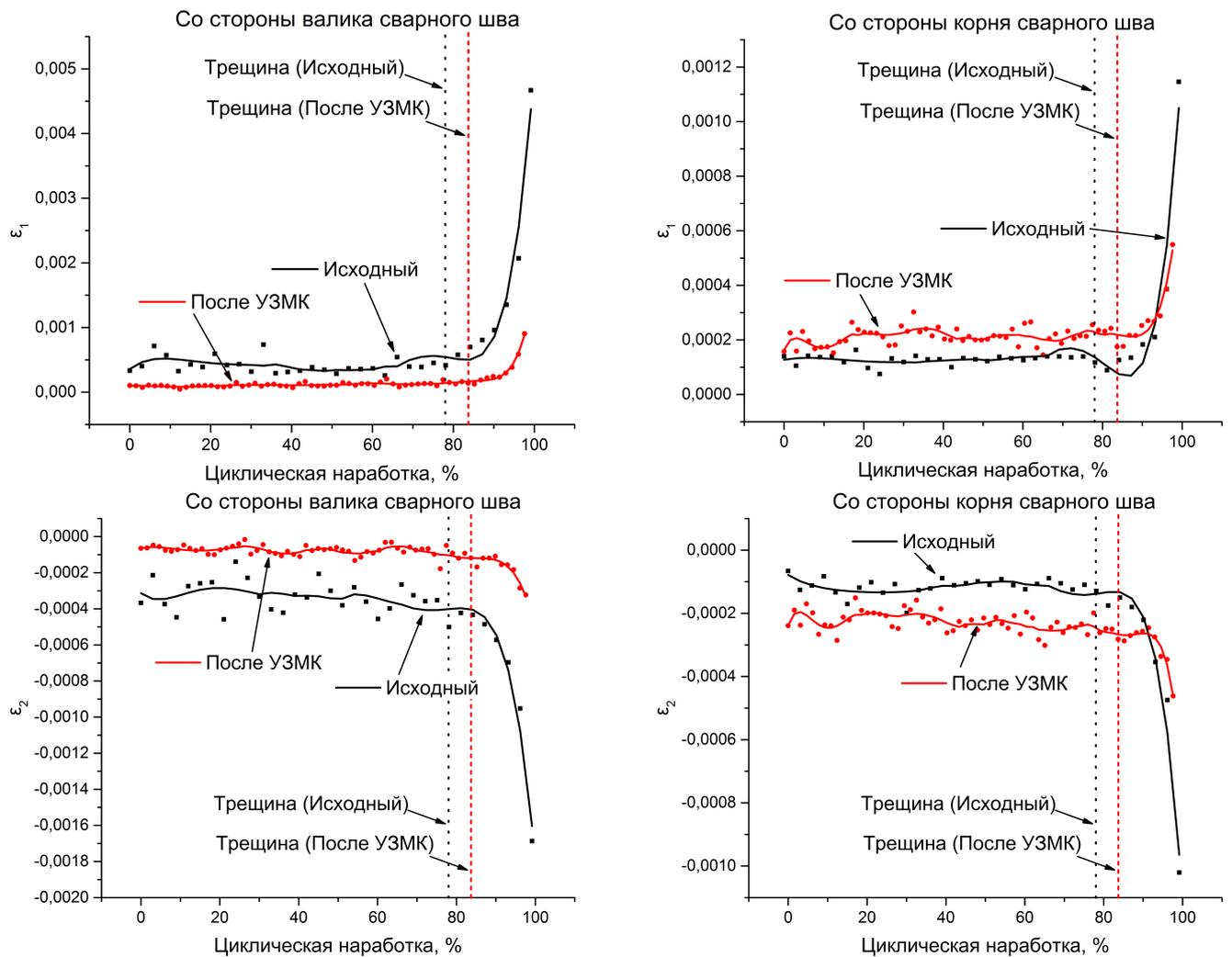


Рисунок 4.18 — Графики изменения среднего значения главных деформаций  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  по мере циклической наработки.

#### 4.4.3 Результаты фрактографического анализа на РЭМ

Фрактографический анализ при помощи растровой электронной микроскопии (РЭМ) показывает, что излом сварного соединения после лазерной сварки в исходном состоянии представляет собой квазискот с тремя характерными зонами разрушения (рисунок 4.19а). Обнаружено, что трещина в исходном состоянии во всех случаях начинает зарождение с поверхности и продвигается радиальным веерообразным фронтом. В этой зоне наблюдаются межзеренные фасетки в виде многоугольников, образовавшиеся при разрушении по границам зерен (рисунок 4.19г). Далее по мере движения и распространения трещины наблюдается небольшой участок ускоренного разрушения, с гребнями волокнисто-полосчатого рельефа, затем более хрупкая полосчатая зона (рисунок 4.19б и 4.19в) и

волокнистая зона долома. На мезомасштабном уровне при разрушении формируется волокнистая структура. На ее профиле хорошо выражена мелкомасштабная ячеистая структура, связанная с динамическими ротациями (рисунок 4.19б).

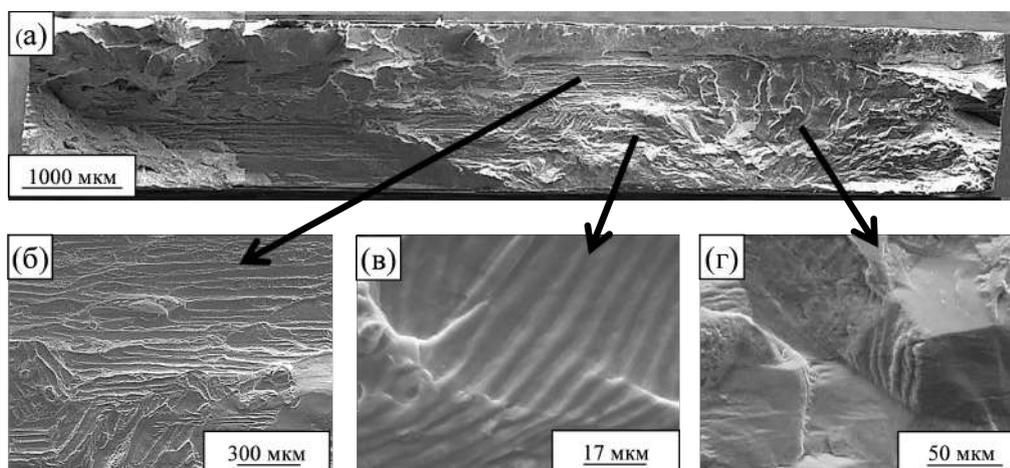


Рисунок 4.19 — РЭМ-фрактограммы сварного соединения титанового сплава ВТ23 после МЦУ без проведения обработки. (а) панорама излома, (б) волокнисто-полосчатый рельеф с пластической вытяжкой на вершинах гребней, (в) бороздки усталостного разрушения, (г) фасетки квазискола при усталостном разрушении.

После комбинированной УЗМК поверхность усталостного разрушения имеет четко выраженный многоуровневый характер. Зарождение трещины начинается с боковой поверхности образцов (рисунок 4.20а), движется радиально с менее развитым ручьистым узором, что свидетельствует о более вязком характере роста усталостной трещины в материале после обработки. Далее формируется протяженная зона волокнисто-полосчатого рельефа излома (рисунок 4.20в и 4.20г). Стоит отметить, что доля вязкой составляющей в волокнисто-полосчатом рельефе также выше у образца с комбинированной УЗМК. Затем наблюдается волокнистая зона лавинного разрушения (рисунок 4.20б).

Оценка площади каждой зоны излома представлена в таблице 4.5. Необходимо отметить, что несмотря на значительное повышение усталостной долговечности, площадь зоны усталостного разрушения для образца с обработкой снизилась на 3,3%, однако возросла доля вязкого и не наблюдается зона хрупкого волокнисто-полосчатого излома. Зона лавинного разрушения (долома) также снизилась.

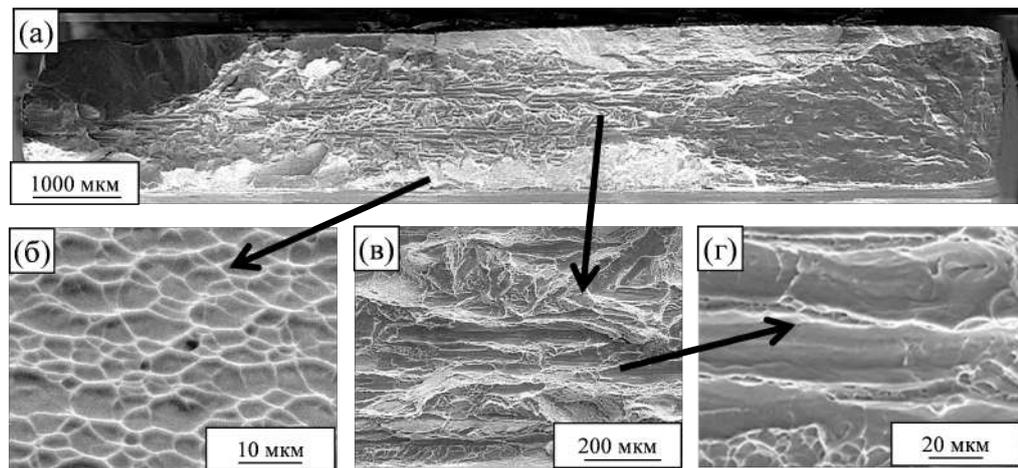


Рисунок 4.20 — РЭМ-фрактограммы сварного соединения титанового сплава ВТ23 после МЦУ с комбинированной обработки поверхностных слоев с УЗМК.

(а) панорама излома, (б) волокнистая зона лавинного разрушения, (в) волокнисто-полосчатый излома с большой долей вязкой составляющей в рельефе, (г) увеличенное изображение волокнисто-полосчатого рельефа.

#### 4.4.4 Заключение по разделу 4.4

Для проведения количественной оценки усталостного разрушения сварных швов титанового сплава ВТ-23 был модернизирован разработанный в разделе 3.3 ЛИДК для фотографирования образца с двух сторон и отдельной обработки двух серий фотографий. Результаты мониторинга дополнены анализом фрактографических снимков, полученных на РЭМ. Используемая комбинация методов позволяет всесторонне охарактеризовать процесс разрушения материала при испытаниях на малоцикловую усталость.

По результатам проведенных испытаний анализ площади различных рельефов на изломе позволяет заключить, что величина усталостной трещины в момент разрушения примерно одинакова для обоих образцов, что означает приблизительно одинаковое значение  $K_{IC}$ . Однако усталостная долговечность показывает значительный прирост числа циклов до разрушения. Подобное противоречие объясняется при помощи метода корреляции цифровых изображений, с помощью которого локализация деформаций фиксируется примерно на одинаковой величине наработки ( $N=11\,000$  и  $N=12\,000$  циклов). Однако дальнейший рост трещины замедляется, так как процесс её роста является более высокодиссипативным в более пластичном материале после комбинированной УЗМК. Эффект замедления роста трещины, наблюдаемый в материале после обработки,

Таблица 4.5 — Относительные площади областей излома с различным рельефом.

Тип рельефа излома	Доля для образца без обработки, %	Доля для образца с обработкой, %	Разница, %
Зона зарождения и распространения усталостной трещины	22,8	19,5	-3,3
Волокнисто-полосчатый рельеф (вязкий)	12,2	37,6	35,4
Волокнисто-полосчатый рельеф (хрупкий)	8,8	—	-8,8
Зона лавинного разрушения	56,2	42,9	-13,3

характерен в большей степени для трещины малого размера в зоне её припорогового роста, т.е. на микро- и мезомасштабном уровне, но не проявляется на макроуровне, так как не повышает общую трещиностойкость материала.

Таким образом, разработанный в данном разделе подход, основанный на комбинированном анализе фотографий поверхности образца методом DIC и исследовании фрактографических снимков, позволяет детально описать эволюцию состояния сильно неоднородного материала со сварным соединением с момента зарождения трещины и до полного разрушения. Применение модернизированного ЛИДК (для фотографирования с двух сторон) и РЭМ фрактографии позволят эффективно и с минимумом затрат человеческого ресурса решать задачи мониторинга процессов усталостного разрушения для класса неоднородных материалов с трудно предсказуемым очагом зарождения усталостных трещин в процессе циклического нагружения.

#### 4.5 Заключение по Главе 4

Разработанные в разделах 2.1 и 3.3 методики и комплексы мониторинга состояния были применены для решения четырех практических задач:

- выявление характерных этапов разрушения стеклопластикового композиционного материала при помощи акустического и модифицированного оптического методов;

- оценка поврежденности трехслойного углепластикового композиционного материала с алюминиевыми сотами при помощи только акустического мониторинга;

- количественная характеристика эффекта упругого восстановления при проведении испытаний на контактное циклическое воздействие в полимерных композитах на основе СВМПЭ;

- оценка усталостного разрушения сварных швов титанового сплава ВТ-23 при помощи метода корреляции цифровых (по фотографиям с двух сторон образца) изображений и РЭМ фрактографии.

Тестирование использованных методов на частных задачах продемонстрировало их работоспособность и возможность выполнения поставленных целей.

Оптико-акустический мониторинг стеклопластиковых материалов позволяет выявлять переходы от одной стадии к другой, в некоторых случаях даже раньше, чем это начинает оказывать заметное влияние на макрохарактеристику деформирования (податливость образца). Модифицированный оптический метод позволяет выявлять первые две стадии процесса накопления повреждений, тогда как при дальнейшем циклическом нагружении поверхность уже насыщена дефектами (короткими трещинами и расслоениями) и чувствительность метода снижается. Однако, результаты, полученные при оценке состояния образцов, в дальнейшем могут быть развиты для мониторинга состояния лопастей работающих ветрогенераторов.

При тестировании метода на трехслойных углепластиковых сэндвич-панелях также были выявлены 4 стадии процесса усталостного разрушения материала и соответствующее этим стадиям поведение выбранных информативных параметров. Зависимости значений параметров и производных от величины циклической наработки демонстрируют стабильные результаты и в явном виде определяют переход разрушения от одного уровня (стадии) к другому.

На примере сопоставления временных зависимостей величин перемещения и компонент деформации показано, что предложенные для анализа информативные параметры позволяют количественно (в величинах смещений и деформаций) и качественно (в виде полей) охарактеризовать процесс упругого восстановления для образцов чистого СВМПЭ и многокомпонентного композита на его основе. Предложенный подход к оценке состояния полимерных композитов на основе СВМПЭ является оригинальным и в дальнейшем может быть использован в качестве метода, основанного на контроле миниатюрных образцов-проб, вырезанных из эксплуатируемых изделий.

Модификация ЛИДК для обработки изображений с двух сторон образца методом DIC и дополнение оптического мониторинга анализом РЭМ-фрактограм позволили получить детализированную картину процесса усталостного разрушения сварных швов сплава ВТ-23. Отчетливо выделяется этап зарождения трещины и её роста. Кроме того, удалось выявить отличия в механизме роста трещины материала после сварки в исходном состоянии и после обработки УЗМК, что проявляется в уровне и времени начала локализации деформаций, скорости роста трещины и типе усталостного излома/долома.

Решение разнообразных прикладных задач для научных целей и в рамках научно-технического сотрудничества с промышленными партнерами, продемонстрировали работоспособность разработанных методов анализа и обработки данных, а также их аппаратно-программной реализации в виде комплексов (ИМК и ЛИДК), которая вследствие модульной структуры (каждой аппаратной составляющей соответствует своя программный блок управления, регистрации и обработки данных) открывает широкие возможности для модернизации, расширения функционала и гибкости в настройке под разнообразные частные задачи.

## Заключение

В рамках диссертационного исследования разработаны и протестированы два комплекса:

– ИМК, реализующий комбинированный оптико-акустический метод мониторинга состояния образцов конструкционных материалов, основанный на расчете информативных параметров регистрируемых акустических сигналов и оптических изображений с выделением характерных стадий их изменения.

– ЛИДК, позволяющий управлять процессом роста усталостной трещины, а также проводить количественную оценку параметров процесса в терминах механики разрушения, рассчитываемых по данным метода корреляции цифровых изображений.

По результатам проведенных экспериментальных исследований сделаны следующие заключения:

1. В задачах комбинированного акустико-оптического контроля образцов алюминиевого сплава В96 для проведения акустического мониторинга установлены резонансные частоты волн Лэмба, составляющие  $f=60$  кГц (антисимметричная мода  $A_0$ ) и  $f=350$  кГц (симметричная мода  $S_0$ ). Для оценки состояния материалов акустическим методом предложено использовать следующие информативные параметры: максимум огибающей (MaxEnv), нормированный коэффициент корреляции (NCC) и второй момент разности ( $\mu_2$ ); в оптическом методе на основе данных, получаемых методом DIC – главные деформации  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ .

2. При проведении комбинированного акустико-оптического контроля образцов алюминиевого сплава В96 показано, что анализ выбранных информативных параметров акустических сигналов позволяет выявлять основные стадии усталостного разрушения: стадии I–II – формирование микроповреждений в объеме материала (0–60% наработки для образца без шва; для образца со сварным швом данная стадия отсутствует); стадия III – рост и слияние микротрещин в области минимального сечения образца (60–95% наработки для образца без шва, 0–59% наработки для образца со швом); стадия IV – зарождение и рост магистральной трещины до разрушения. Различия в длительности стадий для двух типов образцов вызваны неоднородностью структуры и большим количеством начальных дефектов (структурны неоднородностей) в сварном шве, а также различным уровнем нагрузки в цикле. Показано, что зондирование

на частоте  $f=350$  кГц позволяет получать более информативные результаты, поскольку она является более чувствительной к накоплению повреждений, тогда как анализ полей деформаций, рассчитанных оптическим методом, позволяет обнаружить локализацию деформаций в образце, связанную с появлением трещины, однако малочувствителен к изменению состояния материала на более ранних стадиях.

3. Для количественной характеристики процесса роста усталостной трещины в металлических сплавах предложена и протестирована методика, основанная на расчете информативных параметров (в терминах механики разрушения) по данным, получаемым оптическим методом корреляции цифровых изображений, включающая получение оценки: (а) скорости роста усталостной трещины  $da/dN$ ; (б) максимального значения деформации ( $\varepsilon_{max}$ ) и (в) эффективной асимметрии цикла ( $R_{eff}$ ). С использованием разработанной методики при испытании алюминиевого сплава Д16АТ показано, что при единичной перегрузке минимальная скорость роста трещины достигается при длине трещины равной 30% от размера пластической зоны, сформированной циклом перегрузки, и вызвана закрытием трещины, увеличивающим эффективную асимметрию цикла до  $R_{eff}=0,32$ .

4. Проведено исследование функционирования разработанных аппаратно-программных комплексов (ИМК и ЛИДК) в рамках решения прикладных задач по мониторингу состояния стеклопластиковых и трехслойных углепластиковых композитов, а также для оценки процессов усталостного разрушения образцов титанового сплава со сварным соединением. Установлено, что:

- а) Использование комбинированного метода мониторинга состояния образцов стеклопластиковых композитов, основанного на расчете информативных параметров изображений, а именно среднеквадратичной ошибки (MSE) и среднего значения информационной энтропии (H), совместно с акустическим контролем на резонансных частотах  $f=123$  кГц и  $f=243$  кГц позволяет выявлять основные стадии накопления повреждений, соответствующих: 1) растрескиванию матрицы, 2) формированию локальных расслоений, 3) последующему их росту и 4) макроскопическому разрушению.
- б) Использование акустического контроля на резонансной частоте  $f=225$  кГц для мониторинга состояния углепластиковых трехслойных

сэндвич-панелей позволяет эффективно выявлять 4 стадии усталостного разрушения на основе рассчитываемых информативных параметров и их первых производных. При этом первой стадии соответствуют процессы интенсивного накопления микроповреждений; второй стадии — зарождение локализованных макродефектов; третьей стадии — рост макродефектов; четвертой стадии — лавинообразный рост макроповреждения.

- в) Разработанный ЛИДК при оценке усталостного разрушения образцов титанового сплава ВТ23 со сварным соединением позволяет выявлять момент зарождения трещины по изменению распределений деформации, а также получать количественную оценку процесса зарождения и роста усталостной трещины. Определено, что ультразвуковая ударная поверхностная обработка приводит к повышению усталостной долговечности обработанных сварных соединений почти в 2 раза за счет изменения условий зарождения и распространения трещины.

## Список сокращений и условных обозначений

$\mu_2$  — информативный параметр второй центральный момент разности двух сигналов или дисперсия

BVID — barely visible impact damage; малозаметные ударные повреждения

COD — crack opening displacement; величина раскрытия трещины

DIC — digital image correlation; метод корреляции цифровых изображений

GFRP — glass fiber reinforced polymer; полимер, армированный стеклянными волокнами

MaxEnv — maximum envelope; информативный параметр максимальное значение огибающей сигнала

MSE — mean square error; среднеквадратичная ошибка

NCC — normalized correlation coefficient; информативный параметр нормированный коэффициент корреляции между базовым и текущим сигналами

SHM — structural health monitoring; встроенный контроль (мониторинга) состояния

АЧХ — амплитудно-частотная характеристика

ГАС — генератор акустических сигналов

ДПФ — дискретное преобразование Фурье

ИМ — испытательная машина

ИМК — испытательно-мониторинговый комплекс

КДУР — кинетическая диаграмма усталостного разрушения

КИН — коэффициент интенсивности напряжений

КМ — композиционные материалы

КУП — контроллер управления приводами

ЛИДК — лабораторный исследовательско-диагностический комплекс

ЛН — линейные направляющие

ПДС — плоское деформированное состояние

ПНС — плоское напряженное состояние

Программа УН — программа управления нагружением

Программа УНиРТ — программа управления нагружением и регистрацией тензоданных

Программа УСП — программа управления системой позиционирования

Программа УУзМ — программа управления УЗ мониторингом

Программа УЦК — программа управления цифровой камерой

Программный блок ВРР — программный блок визуализации результатов расчета

Программный блок ЗД — программный блок записи данных

Программный блок ОДиРИП — программный блок обработки данных и расчета информативных параметров

Программный блок ОИ — программный блок обработки изображений

ПЭП — пьезоэлектрический преобразователь

РЭМ — растровая электронная микроскопия

СЛНиП — система линейных направляющих и приводов

УЗК — ультразвуковой контроль

УЗМК — комбинированная ультразвуковая механическая ковка

ЦК — цифровая камера

ШЭ — шаговые электродвигатели

## Список литературы

1. *Wöhler A.* Ueber die Festigkeits-Versuche mit Eisen und Stahl / A. Wöhler // Zeitschrift für Bauwesen. — 1870. — Vol. XX. — P. 74—106.
2. *Basquin O. H.* The exponential law of endurance tests / O. H. Basquin // Proceedings of the American Society for Testing and Materials. — 1910. — Vol. 10. — P. 625—630.
3. *Quality Magazine.* Stress-Life Fatigue Testing Basics / Quality Magazine. — 2016.
4. *Fine M. E.* Fatigue resistance of metals / M. E. Fine // Metallurgical Transactions A. — 1980. — Vol. 11, no. 3. — P. 365—379. — DOI: 10.1007/BF02654560.
5. *Mughrabi H.* Cyclic Deformation and Fatigue: some current Problems / H. Mughrabi // Strength of Metals and Alloys (ICSMA 7). — 1986. — Vol. 3. — P. 1917—1942. — DOI: 10.1016/B978-0-08-031640-6.50018-9.
6. *Rabbe P.* Fatigue Crack Initiation / P. Rabbe, L. Anquez // Fatigue of Materials and Structures. — 2013. — P. 69—111. — DOI: 10.1002/9781118623435.ch3.
7. Crack Nucleation in Persistent Slip bands / A. Hunsche [и др.] // Basic Questions in Fatigue. — 1988. — Т. I. — С. 26—38.
8. *Basinski Z. S.* Low amplitude fatigue of copper single crystals - II. Surface observations / Z. S. Basinski, S. J. Basinski // Acta metallurgica. — 1985. — Vol. 33. — P. 1307—1317.
9. *Thompson N.* XI. The origin of fatigue fracture in copper / N. Thompson, N. Wadsworth, N. Louat // Philosophical Magazine. — 1956. — Vol. 1, no. 2. — P. 113—126. — DOI: 10.1080/14786435608238086.
10. *Polák J.* The effect of intermediate annealing on the electrical resistivity and shear stress of fatigued copper / J. Polák // Scripta Metallurgica. — 1970. — Oct. — Vol. 4, no. 10. — P. 761—764. — DOI: 10.1016/0036-9748(70)90056-6.
11. Analysis and support initiative for structural technology (ASIST) delivery order 0016: USAF damage tolerant design handbook: guidelines for the analysis and design : тех. отч. / P. Miedlar [и др.]. — Ohio, USA, 2002.

12. *Irwin G.* Analysis of Stresses and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate / G. Irwin // Journal of Applied Mechanics. — 1957. — Vol. 24, September. — P. 361—364.
13. *Paris P.* A Critical Analysis of Crack Propagation Laws / P. Paris, F. Erdogan // Journal of Basic Engineering. — 1963. — Vol. 85, no. 4. — P. 528. — DOI: 10.1115/1.3656900.
14. *Elber W.* Fatigue Crack Closure Under Cyclic Tension / W. Elber // Engineering Fracture Mechanics. — 1970. — Vol. 2, no. 1. — P. 37—45. — DOI: 10.1016/0013-7944(70)90028-7. — arXiv: arXiv:1011.1669v3.
15. *Newman J.* A Crack-Closure Model for Predicting Fatigue Crack Growth under Aircraft Spectrum Loading / J. Newman // Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth Under Random Loading. — 1981. — No. 81941. — P. 53—53—32. — DOI: 10.1520/STP28334S.
16. *Newman J. J. C.* A Crack Opening Stress Equation for Fatigue Crack Growth - Newman, J.C., - Int. Journal of Fracture (1981).pdf / J. J. C. Newman // International Journal of fracture. — 1984. — Vol. 24, no. 4. — R131—R135.
17. *Матвиенко Ю.* Модели и критерии механики разрушения / Ю. Матвиенко. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2006. — С. 328.
18. *Park I.* Lamb wave mode decomposition for structural health monitoring / I. Park, Y. Jun, U. Lee // Wave Motion. — 2014. — Mar. — Vol. 51, no. 2. — P. 335—347. — DOI: 10.1016/j.wavemoti.2013.09.004.
19. *Wheeler O. E.* Spectrum Loading and Crack Growth / O. E. Wheeler // Journal of Basic Engineering. — 1972. — Vol. 94, no. 1. — P. 181. — DOI: 10.1115/1.3425362.
20. *Talreja R. R.* Fatigue of composite materials / R. R. Talreja. — Elsevier Science Publishers, 1987. — P. 181. — DOI: 10.1017/CBO9781107415324.004. — arXiv: arXiv:1011.1669v3.
21. *Balageas D.* Introduction to Structural Health Monitoring / D. Balageas // Structural Health Monitoring / под ред. D. Balageas, С.-P. Fritzen, A. Gemes. — London, UK : ISTE, 01.2010. — С. 13—43. — DOI: 10.1002/9780470612071.ch1.

22. *Walsh S.* A requirements-based approach to Structural Health Monitoring research, development, and application / S. Walsh // Structural Health Monitoring. — 2003. — P. 79—87.
23. *Beral B.* Structural health monitoring (SHM) for aircraft structures: a challenge for system developers and aircraft manufactures / B. Beral, H. Speckmann // Proc. of the 4th International Workshop on Structural Health Monitoring, Edited by F.-K. Chang, Stanford University. — 2003. — P. 12—29.
24. *Bartelds G.* Aircraft Structural Health Monitoring, Prospects for Smart Solutions from a European Viewpoint / G. Bartelds // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. Vol. 9. — Stanford : Technomic Publishing Co. Inc., 1998. — P. 906—910. — DOI: 10.1177/1045389X9800901106.
25. *Farrar C. R.* An introduction to structural health monitoring / C. R. Farrar, K. Worden // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. — 2007. — Feb. — Vol. 365, no. 1851. — P. 303—315. — DOI: 10.1098/rsta.2006.1928. — arXiv: B.
26. *Diamanti K.* Structural health monitoring techniques for aircraft composite structures / K. Diamanti, C. Soutis // Progress in Aerospace Sciences. — 2010. — Nov. — Vol. 46, no. 8. — P. 342—352. — DOI: 10.1016/j.paerosci.2010.05.001.
27. *Liu W.* Status and problems of wind turbine structural health monitoring techniques in China / W. Liu, B. Tang, Y. Jiang // Renewable Energy. — 2010. — July. — Vol. 35, no. 7. — P. 1414—1418. — DOI: 10.1016/j.renene.2010.01.006.
28. Review of structural health and cure monitoring techniques for large wind turbine blades / P. J. Schubel [et al.] // Renewable Energy. — 2013. — Mar. — Vol. 51. — P. 113—123. — DOI: 10.1016/j.renene.2012.08.072.
29. Fatigue damage and sensor development for aircraft structural health monitoring / S. R. Ignatovich [и др.] // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. — 2013. — ИЮНЬ. — Т. 65. — С. 23—27. — DOI: 10.1016/j.tafmec.2013.05.004.

30. Early fatigue damage detecting sensors-A review and prospects / P. Wang [et al.] // *Sensors and Actuators, A: Physical*. — 2013. — Aug. — Vol. 198. — P. 46—60. — DOI: 10.1016/j.sna.2013.03.025.
31. Development of smart composite structures with small-diameter fiber Bragg grating sensors for damage detection: Quantitative evaluation of delamination length in CFRP laminates using Lamb wave sensing / N. Takeda [et al.] // *Composites Science and Technology*. — 2005. — Dec. — Vol. 65, 15—16 SPEC. ISS. — P. 2575—2587. — DOI: 10.1016/j.compscitech.2005.07.014.
32. Detection of ultrasonic Lamb waves in composite plates using optical-fibres / A. Gachagan [et al.] // *1995 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings. An International Symposium*. Vol. 1. — IEEE, 1995. — P. 803—806. — DOI: 10.1109/ULTSYM.1995.495688.
33. Fibre Optic Polarimetric Detection of Lamb Waves / G. Thursby [et al.] // *Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*. — IEEE, 2002. — P. 321—324. — DOI: 10.1109/OFS.2002.1000568.
34. Generation and reception of ultrasonic guided waves in composite plates using conformable piezoelectric transmitters and optical-fiber detectors / A. Gachagan [et al.] // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. — 1999. — Jan. — Vol. 46, no. 1. — P. 72—81. — DOI: 10.1109/58.741426.
35. Surface-bonded optical fibre sensors for the inspection of CFRP plates using ultrasonic Lamb waves / S. G. Pierce [et al.] // *Smart Mater. Struct.* — 1996. — Dec. — Vol. 5, no. 6. — P. 776—787. — DOI: 10.1088/0964-1726/5/6/007.
36. Structural damage location with fiber Bragg grating rosettes and Lamb waves / D. C. Betz [et al.] // *Structural Health Monitoring*. — 2007. — Dec. — Vol. 6, no. 4. — P. 299—308. — DOI: 10.1177/1475921707081974.
37. *Leonard K. R.* Lamb wave tomography of pipe-like structures / K. R. Leonard, M. K. Hinders // *Ultrasonics*. — 2005. — June. — Vol. 43, no. 7. — P. 574—583. — DOI: 10.1016/j.ultras.2004.12.006.
38. Piezo-activated guided wave propagation and interaction with damage in tubular structures / Y. Lu [et al.] // *Smart Structures and Systems*. — 2010. — Vol. 6, no. 7. — P. 835—849.

39. *Sun Z.* Flexural Torsional Guided Wave Mechanics and Focusing in Pipe / Z. Sun, L. Zhang, J. L. Rose // *Journal of Pressure Vessel Technology*. — 2005. — Vol. 127, no. 4. — P. 471. — DOI: 10.1115/1.2065587.
40. *Tua P. S.* Detection of cracks in cylindrical pipes and plates using piezo-actuated Lamb waves / P. S. Tua, S. T. Quek, Q. Wang // *Smart Materials and Structures*. — 2005. — Dec. — Vol. 14, no. 6. — P. 1325—1342. — DOI: 10.1088/0964-1726/14/6/025.
41. *Dalton R. P.* The potential of guided waves for monitoring large areas of metallic aircraft fuselage structure / R. P. Dalton, P. Cawley, M. J. Lowe // *Journal of Nondestructive Evaluation*. — 2001. — Vol. 20, no. 1. — P. 29—46. — DOI: 10.1023/A:1010601829968.
42. *Ihn J.-B.* Pitch-catch Active Sensing Methods in Structural Health Monitoring for Aircraft Structures / J.-B. Ihn, F.-K. Chang // *Structural Health Monitoring: An International Journal*. — 2008. — Март. — Т. 7, № 1. — С. 5—19. — DOI: 10.1177/1475921707081979.
43. *Giurgiutiu V.* Piezoelectric wafer embedded active sensors for aging aircraft structural health monitoring / V. Giurgiutiu, A. Zagrai, J. J. Bao // *Structural Health Monitoring*. — 2002. — July. — Vol. 1, no. 1. — P. 41—61. — DOI: 10.1177/147592170200100104.
44. *Harri K.* On-line damage detection on a wing panel using transmission of multisine ultrasonic waves / K. Harri, P. Guillaume, S. Vanlanduit // *NDT and E International*. — 2008. — ИЮНЬ. — Т. 41, № 4. — С. 312—317. — DOI: 10.1016/j.ndteint.2007.10.012.
45. A comparison of embedded sensor Lamb wave ultrasonic tomography approaches for material loss detection / Т. R. Hay [и др.] // *Smart Materials and Structures*. — 2006. — АВГ. — Т. 15, № 4. — С. 946—951. — DOI: 10.1088/0964-1726/15/4/007.
46. *Nedospasov I. A.* Unusual energy properties of leaky backward Lamb waves in a submerged plate / I. A. Nedospasov, V. G. Mozhaev, I. E. Kuznetsova // *Ultrasonics*. — 2017. — May. — Vol. 77. — P. 95—99. — DOI: 10.1016/j.ultras.2017.01.025.

47. *Cho H.* Structural health monitoring of fatigue crack growth in plate structures with ultrasonic guided waves / H. Cho, C. J. Lissenden // *Structural Health Monitoring*. — 2012. — July. — Vol. 11, no. 4. — P. 393—404. — DOI: 10.1177/1475921711430439.
48. *Glushkov E.* Guided wave based nondestructive testing and evaluation of effective elastic moduli of layered composite materials / E. Glushkov, N. Glushkova, A. Eremin // *Materials Physics and Mechanics*. — 2015. — Vol. 23, January. — P. 56—60.
49. *Lunev A.* Velocity and attenuation of ultrasound waves under cyclic loading of low-carbon steel / A. Lunev, M. Nadezhkin, L. Zuev // *AIP Conference Proceedings*. Vol. 1783. — 2016. — P. 020140. — DOI: 10.1063/1.4966433.
50. Structural health monitoring of a composite skin-stringer assembly using within-the-bond strategy of guided wave propagation / M. H. Sherafat [et al.] // *Materials and Design*. — 2016. — Jan. — Vol. 90. — P. 787—794. — DOI: 10.1016/j.matdes.2015.11.018.
51. *Flynn E. B.* A Bayesian approach to optimal sensor placement for structural health monitoring with application to active sensing / E. B. Flynn, M. D. Todd // *Mechanical Systems and Signal Processing*. — 2010. — May. — Vol. 24, no. 4. — P. 891—903. — DOI: 10.1016/j.ymsp.2009.09.003.
52. *Lee B. C.* Sensor location studies for damage detection with Lamb waves / B. C. Lee, W. J. Staszewski // *Smart Materials and Structures*. — 2007. — Apr. — Vol. 16, no. 2. — P. 399—408. — DOI: 10.1088/0964-1726/16/2/019.
53. *Moore E. Z.* Optimized sensor placement for damage parameter estimation: Experimental results for a cracked plate / E. Z. Moore, K. D. Murphy, J. M. Nichols // *Structural Health Monitoring*. — 2013. — May. — Vol. 12, no. 3. — P. 197—206. — DOI: 10.1177/1475921713476330.
54. *Attarian V. A.* Long-term stability of guided wave structural health monitoring using distributed adhesively bonded piezoelectric transducers / V. A. Attarian, F. B. Cegla, P. Cawley // *Structural Health Monitoring: An International Journal*. — 2014. — May. — Vol. 13, no. 3. — P. 265—280. — DOI: 10.1177/1475921714522842.

55. *Schubert K. J.* Non-damage-related influences on Lamb wave-based structural health monitoring of carbon fiber-reinforced plastic structures / K. J. Schubert, C. Brauner, A. S. Herrmann // *Structural Health Monitoring*. — 2014. — Mar. — Vol. 13, no. 2. — P. 158—176. — DOI: 10.1177/1475921713513975.
56. *Wandowski T.* Delamination detection in CFRP panels using EMI method with temperature compensation / T. Wandowski, P. H. Malinowski, W. M. Ostachowicz // *Composite Structures*. — 2016. — Sept. — Vol. 151. — P. 99—107. — DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.02.056.
57. *Dodson J. C.* Thermal sensitivity of Lamb waves for structural health monitoring applications / J. C. Dodson, D. J. Inman // *Ultrasonics*. — 2013. — Mar. — Vol. 53, no. 3. — P. 677—685. — DOI: 10.1016/j.ultras.2012.10.007.
58. *Kullaa J.* Distinguishing between sensor fault, structural damage, and environmental or operational effects in structural health monitoring / J. Kullaa // *Mechanical Systems and Signal Processing*. — 2011. — Nov. — Vol. 25, no. 8. — P. 2976—2989. — DOI: 10.1016/j.ymsp.2011.05.017.
59. *Lonkar K.* Modeling of piezo-induced ultrasonic wave propagation in composite structures using layered solid spectral element / K. Lonkar, F.-K. Chang // *Structural Health Monitoring: An International Journal*. — 2014. — Jan. — Vol. 13, no. 1. — P. 50—67. — DOI: 10.1177/1475921713500514.
60. *Fromme P.* High-frequency guided ultrasonic waves to monitor corrosion thickness loss / P. Fromme, F. Bernhard, B. Masserey // *AIP Conference Proceedings*. Vol. 1806. — 2017. — P. 030006. — DOI: 10.1063/1.4974574.
61. *Кориков А. М.* Корреляционные зрительные системы роботов / А. М. Кориков, В. И. Сырямкин, В. С. Титов. — Томск : Радио и связь, 1990. — С. 264.
62. *Giachetti A.* Matching techniques to compute image motion / A. Giachetti // *Image and Vision Computing*. — 2000. — Feb. — Vol. 18, no. 3. — P. 247—260. — DOI: 10.1016/S0262-8856(99)00018-9.
63. Способ неразрушающего контроля механического состояния объектов и устройство для его осуществления / Е. Е. Дерюгин [и др.]. — 02.1999.
64. *Панин С. В.* Оценка деформации твердых тел по изображениям поверхности / С. В. Панин, В. И. Сырямкин, П. С. Любутин // *Автометрия*. — 2005. — Т. 41, № 2. — С. 44—58.

65. *Токарев М. П.* Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости / М. П. Токарев, Д. М. Маркович, А. В. Бильский // Вычислительные технологии. — 2007. — Т. 12, № 3. — С. 109—131.
66. Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis / M. Sutton [et al.] // Image and Vision Computing. — 1986. — Aug. — Vol. 4, no. 3. — P. 143—150. — DOI: 10.1016/0262-8856(86)90057-0.
67. *Schreier H.* Image correlation for shape, motion and deformation measurements: Basic concepts, theory and applications / H. Schreier, J. J. Orteu, M. A. Sutton. — Boston, MA : Springer US, 2009. — P. 1—321. — DOI: 10.1007/978-0-387-78747-3. — arXiv: 1011.1669.
68. *Панин С.* Анализ изображений в оптическом методе оценки деформации / С. Панин, П. Любутин, В. Титков ; под ред. А. Светлаков. — Томск : Издательство СО РАН, 2017. — С. 324.
69. *Nowell D.* Application of digital image correlation to the investigation of crack closure following overloads / D. Nowell, P. F. De Matos // Procedia Engineering. — 2010. — Apr. — Vol. 2, no. 1. — P. 1035—1043. — DOI: 10.1016/j.proeng.2010.03.112.
70. Investigation of fatigue crack closure using multiscale image correlation experiments / J. Carroll [et al.] // Engineering Fracture Mechanics. — 2009. — Oct. — Vol. 76, no. 15. — P. 2384—2398. — DOI: 10.1016/j.engfracmech.2009.08.002.
71. *Yusof F.* Effect of overload on crack closure in thick and thin specimens via digital image correlation / F. Yusof, P. Lopez-Crespo, P. J. Withers // International Journal of Fatigue. — 2013. — Nov. — Vol. 56. — P. 17—24. — DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2013.07.002.
72. *Mathieu F.* Identification of a crack propagation law by digital image correlation / F. Mathieu, F. Hild, S. Roux // International Journal of Fatigue. — 2012. — Mar. — Vol. 36, no. 1. — P. 146—154. — DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2011.08.004.

73. *Lu Z.* Small time scale fatigue crack growth analysis / Z. Lu, Y. Liu // International Journal of Fatigue. — 2010. — Aug. — Vol. 32, no. 8. — P. 1306—1321. — DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2010.01.010.
74. *Toribio J.* Finite-deformation analysis of the crack-tip fields under cyclic loading / J. Toribio, V. Kharin // International Journal of Solids and Structures. — 2009. — May. — Vol. 46, no. 9. — P. 1937—1952. — DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2009.01.006.
75. High resolution digital image correlation measurements of strain accumulation in fatigue crack growth / J. D. Carroll [et al.] // International Journal of Fatigue. — 2013. — Dec. — Vol. 57. — P. 140—150. — DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2012.06.010.
76. Near-tip strain evolution under cyclic loading: In situ experimental observation and numerical modelling / J. Tong [et al.] // International Journal of Fatigue. — 2015. — Feb. — Vol. 71. — P. 45—52. — DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.02.013.
77. *Zhang R.* Measurement of mixed-mode stress intensity factors using digital image correlation method / R. Zhang, L. He // Optics and Lasers in Engineering. — 2012. — July. — Vol. 50, no. 7. — P. 1001—1007. — DOI: 10.1016/j.optlaseng.2012.01.009.
78. *Rice J. R.* A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks / J. R. Rice // Journal of Applied Mechanics. — 1968. — T. 35, № 2. — C. 379—386. — DOI: 10.1115/1.3601206.
79. *Cherepanov G.* Crack propagation in continuous media / G. Cherepanov // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. — 1967. — ЯНВ. — Т. 31, № 3. — C. 503—512. — DOI: 10.1016/0021-8928(67)90034-2.
80. An approach to calculate the J-integral by digital image correlation displacement field measurement / T. H. Becker [et al.] // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. — 2012. — Oct. — Vol. 35, no. 10. — P. 971—984. — DOI: 10.1111/j.1460-2695.2012.01685.x.
81. J-Integral Calculation by Finite Element Processing of Measured Full-Field Surface Displacements / S. M. Barhli [et al.] // Experimental Mechanics. — 2017. — July. — Vol. 57, no. 6. — P. 997—1009. — DOI: 10.1007/s11340-017-0275-1.

82. Analysis of standard fracture toughness test based on digital image correlation data / I. Jandjsek [et al.] // *Engineering Fracture Mechanics*. — 2017. — Sept. — Vol. 182. — P. 607—620. — DOI: 10.1016/j.engfracmech.2017.05.045.
83. A J-integral approach using digital image correlation for evaluating stress intensity factors in fatigue cracks with closure effects / G. L. González [et al.] // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. — 2017. — Aug. — Vol. 90. — P. 14—21. — DOI: 10.1016/j.tafmec.2017.02.008.
84. *McNeill S. R.* Estimation of stress intensity factor by digital image correlation / S. R. McNeill, W. H. Peters, M. A. Sutton // *Engineering Fracture Mechanics*. — 1987. — Jan. — Vol. 28, no. 1. — P. 101—112. — DOI: 10.1016/0013-7944(87)90124-X.
85. *Yoneyama S.* Automatic evaluation of mixed-mode stress intensity factors utilizing digital image correlation / S. Yoneyama, Y. Morimoto, M. Takashi // *Strain*. — 2006. — Feb. — Vol. 42, no. 1. — P. 21—29. — DOI: 10.1111/j.1475-1305.2006.00246.x.
86. *Lorenzino P.* Application of digital image correlation (DIC) in resonance machines for measuring fatigue crack growth. Vol. 30 / P. Lorenzino, G. Beretta, A. Navarro. — 2014. — P. 369—374. — DOI: 10.3221/IGF-ESIS.30.44.
87. Investigation of thermal effects on fatigue crack closure using multiscale digital image correlation experiments / M. C. Casperson [et al.] // *International Journal of Fatigue*. — 2014. — Apr. — Vol. 61. — P. 10—20. — DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2013.11.020.
88. *Matos P. F. P. de.* Experimental and numerical investigation of thickness effects in plasticity-induced fatigue crack closure / P. F. P. de Matos, D. Nowell // *International Journal of Fatigue*. — 2009. — Nov. — Vol. 31, no. 11/12. — P. 1795—1804. — DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2008.12.003.
89. *Roux S.* Stress intensity factor measurements from digital image correlation: Post-processing and integrated approaches / S. Roux, F. Hild // *International Journal of Fracture*. — 2006. — July. — Vol. 140, no. 1—4. — P. 141—157. — DOI: 10.1007/s10704-006-6631-2.

90. Evaluating J-integral from displacement fields measured by digital image correlation / S. Yoneyama [et al.] // *Strain*. — 2014. — Apr. — Vol. 50, no. 2. — P. 147–160. — DOI: 10.1111/str.12074.
91. Estimation of mixed-mode stress intensity factors using digital image correlation and an interaction integral / J. Rethore [и др.] // *International Journal of Fracture*. — 2005. — Март. — Т. 132, № 1. — С. 65–79. — DOI: 10.1007/s10704-004-8141-4.
92. *3M. 3 Scotch-Weld Epoxy Adhesives DP105Clear Technical Data* / 3M. — 2017.
93. *Панин В. Е. В. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов в 2 т. Т. 2* / В. Е. В. Панин, П. В. Макаров, С. Г. Псахье ; под ред. В.Е. Панин. — Новосибирск : Наука, 1995. — С. 320.
94. Исследование эффективности применения билатерального фильтра в задачах вычисления оптического потока / В. Титков [и др.] // *АВТОМЕТРИЯ*. — 2017. — Т. 53, № 6. — С. 57–66.
95. Effects of subpixel image restoration on digital correlation error estimates / M. A. Sutton [et al.] // *Optical Engineering*. — 1988. — Oct. — Vol. 27, no. 10. — P. 870–877. — DOI: 10.1117/12.7976778.
96. *Панин С. В. Сглаживание векторных полей с использованием поверхности Безье при оценке деформации методом корреляции цифровых изображений* / С. В. Панин, В. В. Титков, П. С. Любутин // *Автометрия*. — 2014. — Т. 50, № 1. — С. 74–81.
97. *Воскобойников Ю. Нелинейные алгоритмы фильтрации векторных сигналов* / Ю. Воскобойников, В. Белявцев // *Автометрия*. — 1999. — Т. 35, № 5. — С. 48–57.
98. *Роджерс Д. Математические основы машинной графики* / Д. Роджерс, Д. Адамс. — Москва : Мир, 2001. — С. 604.
99. Finite element formulation for a digital image correlation method / Y. Sun [et al.] // *Applied Optics*. — 2005. — Dec. — Vol. 44, no. 34. — P. 7357–7363. — DOI: 10.1364/AO.44.007357.

100. *Besnard G.* "Finite-element" displacement fields analysis from digital images: Application to Portevin-Le Châtelier bands / G. Besnard, F. Hild, S. Roux // *Experimental Mechanics*. — 2006. — Vol. 46, no. 6. — P. 789—803. — DOI: 10.1007/s11340-006-9824-8. — arXiv: 0511122 [physics].
101. *Pan B.* Comparison of subset-based local and FE-based global digital image correlation: Theoretical error analysis and validation / B. Pan, B. Wang, G. Lubineau // *Optics and Lasers in Engineering*. — 2016. — July. — Vol. 82. — P. 148—158. — DOI: 10.1016/j.optlaseng.2016.02.019.
102. Mode and Transducer Selection for Long Range Lamb Wave Inspection / P. D. Wilcox [et al.] // *Key Engineering Materials*. — 1999. — Vol. 167/168. — P. 152—161. — DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.167-168.152.
103. *Su Z.* Identification of Damage Using Lamb waves. Vol. 48 / Z. Su, L. Ye. — London : Springer London, 2009. — P. 346. — (Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics). — DOI: 10.1007/978-1-84882-784-4. — arXiv: arXiv:1011.1669v3.
104. *Лайонс Р.* Цифровая обработка сигналов / Р. Лайонс ; под ред. А. Бритов. — Второе изд. — Москва : ООО «Бином-Пресс», 2006. — С. 656.
105. *Hahn S. L.* Hilbert Transforms in Signal Processing / S. L. Hahn. — Boston : Artech House, 1996. — С. 442.
106. *Колмогоров А.* Основные понятия теории вероятностей / А. Колмогоров. — Москва : Наука, 1974. — С. 120.
107. *Choi M.* Efficient calculation of statistical moments for structural health monitoring / M. Choi, B. Sweetman // *Structural Health Monitoring*. — 2010. — Jan. — Vol. 9, no. 1. — P. 13—24. — DOI: 10.1177/1475921709341014.
108. Investigation of Lamb Wave Based Ultrasonic Technique for AA2024 Evaluation at Static Tensile Loading / A. V. Byakov [et al.] // *Key Engineering Materials*. — 2016. — Feb. — Vol. 685. — P. 394—398. — DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685.394.
109. Application of a Lamb waves based technique for structural health monitoring of GFRP undercyclic loading / A. Eremin [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2016. — Apr. — Vol. 124, no. 1. — P. 012084. — DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012084.

110. Structural health monitoring using scanning laser vibrometry: I. Lamb wave sensing / W. J. Staszewski [et al.] // *Smart Materials and Structures*. — 2004. — Apr. — Vol. 13, no. 2. — P. 251–260. — DOI: 10.1088/0964-1726/13/2/002.
111. Lamb Wave Based Ultrasonic Technique for AA2024 Fatigue Evaluation / M. V. Burkov [et al.] // *Key Engineering Materials*. — 2016. — Feb. — Vol. 685. — P. 399–402. — DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685.399.
112. *Sunder R.* Characterization of Threshold Stress Intensity as a Function of Near-Tip Residual Stress: Theory, Experiment, and Applications / R. Sunder // *Materials Performance and Characterization*. — 2015. — Feb. — Vol. 4, no. 2. — MPC20140037. — DOI: 10.1520/MPC20140037.
113. *Willenborg J.* A Crack Growth Retardation Model Using an Effective Stress Concept / J. Willenborg, R. Engle, R. Wood // *Air Force Flight Dynamics Laboratory Report, AFFDL-TM-71-1-FBR*. — 1971.
114. *Elber W.* The significance of fatigue crack closure / W. Elber // *Damage Tolerance in Aircraft Structures*. — 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, 1971. — Vol. 486. — P. 230–230–13. — DOI: 10.1520/STP26680S.
115. *Sunder R.* Characterization of Threshold Stress Intensity as a Function of Near-Tip Residual Stress: Theory, Experiment, and Applications / R. Sunder // *Materials Performance and Characterization*. — 2015. — Февр. — Т. 4, № 2. — MPC20140037. — DOI: 10.1520/MPC20140037.
116. *Bichler C.* Effect of single overloads in ductile metals: A reconsideration / C. Bichler, R. Pippan // *Engineering Fracture Mechanics*. — 2007. — May. — Vol. 74, no. 8. — P. 1344–1359. — DOI: 10.1016/j.engfracmech.2006.06.011.
117. Synergy of crack closure, near-tip residual stress and crack-tip blunting in crack growth under periodic overloads – A fractographic study / R. Sunder [et al.] // *International Journal of Fatigue*. — 2016. — Dec. — Vol. 93. — P. 18–29. — DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2016.08.004.
118. *Song K. Y.* Texture crack detection / K. Y. Song, M. Petrou, J. Kittler // *Machine Vision and Applications*. — 1995. — Jan. — Vol. 8, no. 1. — P. 63–75. — DOI: 10.1007/BF01213639.

119. *Kirschke K.* Histogram-based approach for automated pavement-crack sensing / K. Kirschke, S. Velinsky // *Transportation Engineering*. — 1992. — Sept. — Vol. 118, no. 5. — P. 700—710. — DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(1992)118:5(700).
120. *Yamaguchi T.* Fast crack detection method for large-size concrete surface images using percolation-based image processing / T. Yamaguchi, S. Hashimoto // *Machine Vision and Applications*. — 2010. — Aug. — Vol. 21, no. 5. — P. 797—809. — DOI: 10.1007/s00138-009-0189-8.
121. *Iyer S.* A robust approach for automatic detection and segmentation of cracks in underground pipeline images / S. Iyer, S. K. Sinha // *Image and Vision Computing*. — 2005. — Sept. — Vol. 23, no. 10. — P. 921—933. — DOI: 10.1016/j.imavis.2005.05.017.
122. *Lins R. G.* Automatic Crack Detection and Measurement Based on Image Analysis / R. G. Lins, S. N. Givigi // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. — 2016. — Март. — Т. 65, № 3. — С. 583—590. — DOI: 10.1109/TIM.2015.2509278.
123. Алгоритм Детектирования Усталостной Трещины И Определения Местоположения Её Вершины На Оптических Изображениях / С. Панин [и др.] // *Автометрия*. — 2017. — Т. 53, № 3. — С. 44—52. — DOI: 10.15372/AUT20170306.

## Приложение А

### Акт внедрения ПАО «Компания Сухой» «ОКБ Сухого»

Филиал Публичного акционерного общества  
«Авиационная холдинговая компания «Сухой»  
**«ОКБ Сухого»**

УТВЕРЖДАЮ  
Начальник НИО 21

 А.А. Филатов

АКТ ВНЕДРЕНИЯ № 4/432021/1024/ОКБ

Акт составлен комиссией в составе начальника отдела НМК С.А. Хижняка, инженера-технолога 1 кат. отдела НМК А.Г. Баранова, зав. лаб. МПКМ д.т.н. С.В. Панина, научного сотрудника лаборатории МПКМ к.т.н. М.В. Буркова, в том, что в рамках договора между филиалом ПАО «Компания Сухой» «ОКБ Сухого» и ИФПМ СО РАН (согласно ТЗ № БТ-ОНМК-001-2014 на научно-исследовательскую работу «Исследование возможности применения встроенных методов неразрушающего контроля для металлических и полимерных композиционных материалов»), аспирант А.В. Еремин участвовал в выполнении работ по разработке метода встроенного мониторинга состояния металлических и полимерных композиционных материалов волнами Лэмба. В основе указанного подхода лежит зондирование волнами Лэмба (при помощи сети пьезоэлектрических излучателей/приемников) нагруженной зоны конструкции и анализ изменений информативных параметров принимаемых акустических сигналов по мере роста степени поврежденности материала. Выявляемыми информативными параметрами являются максимальное значение огибающей сигнала, нормированный коэффициент корреляции между базовым и текущим сигналами и второй центральный момент разности двух сигналов. Указанный метод позволяет производить мониторинг состояния конструкции в процессе ее эксплуатации (испытания), получать характеристику степени поврежденности и прогнозировать остаточный ресурс их работы. На основании выполненной НИР была составлена технологическая рекомендация по проведению мониторинга образцов материалов и конструкций акустическим методом.

От ИФПМ СО РАН

От филиала ПАО «Компания Сухой»  
«ОКБ Сухого»

Заведующий лабораторией  
МПКМ ИФПМ СО РАН

 С.В. Панин

Начальник ОНМК

 С.А. Хижняк

Научный сотрудник  
МПКМ ИФПМ СО РАН

 М.В. Бурков

Инженер-технолог 1 кат. ОНМК

 А.Г. Баранов

## Приложение Б

### Акт внедрения в учебный процесс НИ ТПУ

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной  
деятельности ТПУ



А.Р. Вагнер

2018 г.

АКТ

#### о внедрении результатов кандидатской диссертации Еремина А. В. в учебный процесс ТПУ

Настоящим подтверждается, что результаты диссертации Еремина А.В. «Мониторинг состояния металлических и армированных полимерных материалов при усталостном разрушении оптическим и акустическим методами», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий», используются в учебном процессе в Инженерной школе новых производственных технологий Национального Исследовательского Томского политехнического университета при изучении дисциплин «Мониторинг состояния и контроль надежности материалов и изделий» и «Диагностика материалов» для магистров по направлению 22.04.01 – Материаловедение и технологии материалов.

Директор ИШНПТ,  
к.ф.-м.н., доцент

А.Н. Яковлев

Руководитель отделения материаловедения  
д.т.н., профессор

В.А. Клименов