

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте 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).

Научный
руководитель:

Панин Сергей Викторович
доктор технических наук, профессор

Официальные
оппоненты:

Герасимов Сергей Иванович, доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения», профессор, заведующий кафедрой «Строительная механика»

Смирнов Александр Николаевич, доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», профессор кафедры «Технологии машиностроения»

Ведущая
организация:

Федеральное государственное унитарное предприятие «Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А. Чаплыгина»

Защита состоится 11 декабря 2018 г. в 17⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, Россия, г. Томск, ул. Савиных, д. 7, Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Белинского, 53 и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/916>.

Автореферат разослан «___» октября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.269.09
кандидат технических наук, доцент



Е.А. Шевелева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Уилкокс, 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 (п. 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 (п. 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 локализации повреждений в крупногабаритных изделиях при проведении комбинированного акустического и оптического мониторинга. На «Программу для локализации 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, а также 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, опубликованными 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 (пп. 1, 6 паспорта специальности 05.13.11).

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 (пп. 1, 6 паспорта специальности 05.13.11).

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 (п. 1 паспорта специальности 05.13.11).

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 нанокомпозитов 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 малоцикловой 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 и заключения. Полный объём диссертации составляет 166 страниц. Она иллюстрирована 62 рисунками и 6 таблицами. Список литературы содержит 123 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются цель и задачи исследования, научная новизна и положения, выносимые на защиту.

В первой главе 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 ее вершины, влиянию неоднородного нагружения на рост трещины, а также описываются особенности разрушения композиционных материалов, армированных непрерывными волокнами. Второй раздел посвящен развитию подходов к проведению мониторинга структурной целостности и применению волн Лэмба для оценки степени поврежденности материала. Третий раздел содержит общие сведения о методе корреляции цифровых изображений и анализ публикаций по его применению для расчета полей деформаций и оценки параметров механики разрушения в процессе роста усталостной трещины. По результатам проведенного анализа в конце главы формулируются задачи исследований.

Во второй главе приводится описание исследований по разработке испытательно-мониторингового комплекса (ИМК) на основе комбинированного использования оптического (на основе метода корреляции цифровых изображений) и акустического (на основе волн Лэмба) методов.

Разработка ИМК проводилась исходя из необходимости удовлетворения следующим требованиям:

1) Автоматизированный режим проведения испытаний с заданными параметрами, 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 состояния материала, вызванного развитием деформации, накоплением повреждений и разрушением, путем расчета совокупности информативных параметров на основе анализа оптических изображений и акустических сигналов.

Была разработана принципиальная схема ИМК, изображенная на рисунке 1а, которая включает в себя три функциональные системы (оптическую, акустическую и тензометрическую).

- Система нагружения, включающая штатные блоки испытательной машины (ИМ): контроллер ИМ, датчики нагрузки и перемещения, механизм нагружения; а также Программный блок для контроля процесса испытаний и регистрации тензоданных.

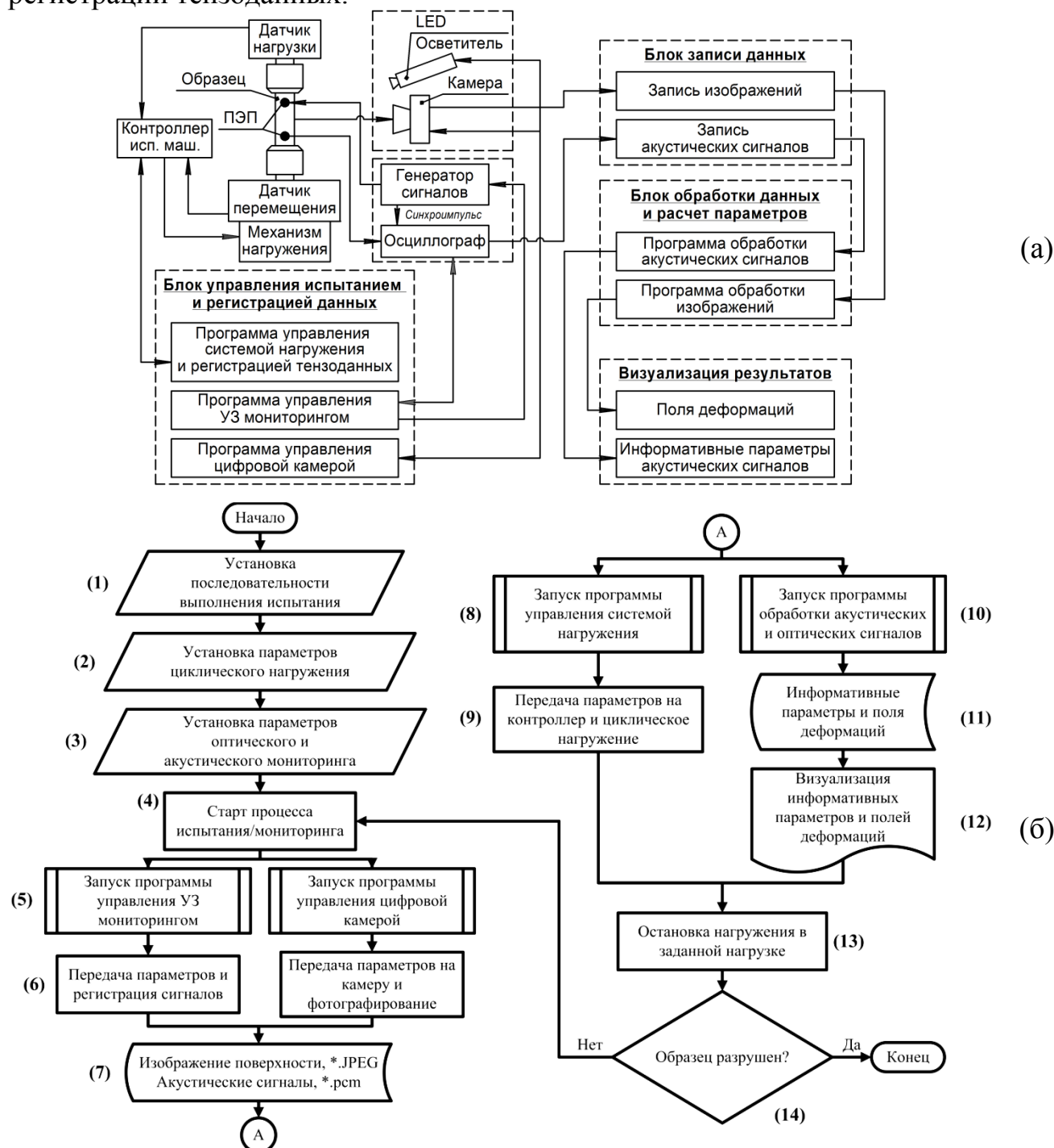


Рисунок 1 – Схема ИМК для оценки механического состояния конструкционных материалов комбинированным оптическим (на основе DIC) и ультразвуковым (на основе волн Лэмба) методом (а) – принципиальная схема, (б) – схема алгоритма.

- Система ультразвукового мониторинга, включающая следующее оборудование: генератор акустических сигналов, осциллограф, пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП); а также программы для: управления УЗ-мониторингом, записи акустических сигналов, обработки и визуализации информативных параметров.
- Система оптического мониторинга, состоящая из цифровой камеры и осветителя, а также программ управления цифровой камерой, записи изображений, обработки изображений и визуализации полей деформаций и информативных параметров.

Алгоритм работы ИМК изображен в виде схемы на рисунке 1б. На начальном этапе оператором задаются необходимые параметры испытания и мониторинга (Блоки 1-3), после чего происходит запуск процесса испытаний/мониторинга (Блок 4). Далее работа ИМК проводится в автоматическом режиме: выполняется процедура одновременной регистрации УЗ-сигналов и изображений (Блоки 5-7). Затем запускается процедура циклического нагружения образца (Блоки 8-9), параллельно которой выполняется расчет информативных параметров с целью мониторинга состояния (Блоки 10-12). Критерием завершения испытания является разрушение образца (Блок 14).

Для реализации ИМК с учетом предъявляемых к нему требований и предложенных схемы и алгоритма работы были выбраны следующие аппаратные средства: Испытательная машина BISS UTM 150; Зеркальная цифровая фотокамера Canon EOS 700D, оснащенная объективом Canon EF 70-300 mm 4-5.6L; студийный светодиодный осветитель Jinbei EF-100 LED Sun Light; 2-х канальный цифровой осциллограф с функцией генератора на отдельном канале Handyscope HS5-220; Пьезоэлектрические преобразователи AW1E12G-190EFL1Z.

В качестве информативных параметров были использованы: Максимальное значение огибающей сигнала (MaxEnv), Нормированный коэффициент корреляции между базовым и текущим сигналами (NCC), Второй центральный момент разности двух сигналов – дисперсия (μ_2). Для оценки полей деформаций используются значения главных деформаций ε_1 и ε_2 .

Максимальное значение огибающей сигнала. На первом этапе проводится N -точечное дискретное преобразование Фурье (ДПФ) сигнала длительностью N отсчетов. Затем отсчёты $X_c(m)$ спектра, соответствующие отрицательным частотам, то есть отсчёты с номерами $(N/2)+1 \leq m \leq N-1$, приравниваются нулю. После чего выполняется обратное N -точечное ДПФ. Полученная функция является огибающей сигнала, находится ее максимальное значение.

Нормированный коэффициент корреляции.

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

где X_i , Y_i – амплитуда опорного (неповрежденное состояние) и текущего (с некоторой степенью поврежденности) сигналов на отсчете с номером i , N – длительность записанного сигнала.

Второй центральный момент.

$$\mu_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N f_i^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=0}^N f_i \right)^2$$

где f_i – разность между значениями огибающих двух сигналов на отсчете с номером i , N – длительность записанного сигнала.

Тестирование разработанного ИМК проведено на образцах из алюминиевого сплава В96ц3Т12 двух видов: образцы однородного (в состоянии поставки) материала и образцы со сварным соединением, выполненным аргонодуговой сваркой. Величина прикладываемой нагрузки выбрана таким образом, чтобы достичь разрушения в течение 10^5 циклов. Для образцов без сварного шва $P_{max}=0,6\sigma_s \cdot A$ (где A – площадь рабочего сечения образца), а для образцов со сварным швом $P_{max}=0,4\sigma_s \cdot A$, асимметрия $R=0,1$. Фотографирование поверхности образца и запись акустических сигналов производились при максимальной нагрузке в цикле через каждые $\Delta N=2000$ циклов. По результатам анализа амплитудно-частотной характеристики были выбраны оптимальные частоты ультразвукового мониторинга $f=60$ кГц и $f=350$ кГц. В испытании акустический сигнал осреднялся по 100 измерениям.

Результаты комплексного анализа изменений состояния образцов по данным комбинированного оптико-акустического мониторинга представлены в виде графиков информативных параметров и полей деформаций на рисунках 2-5.

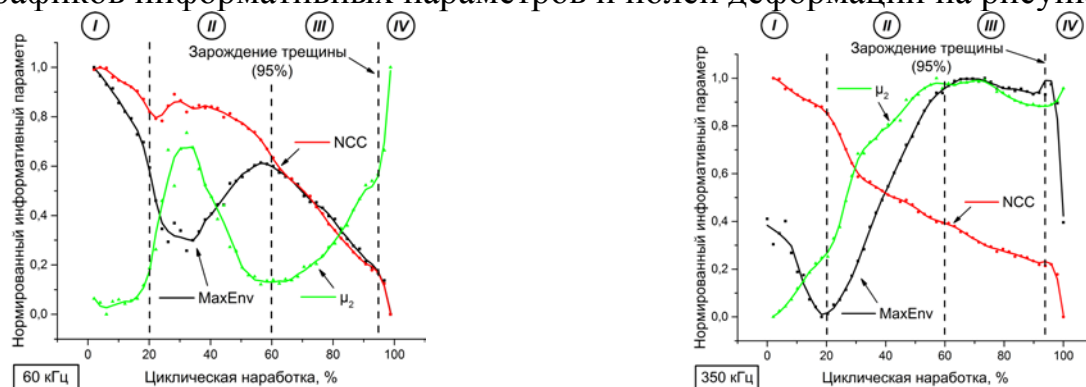


Рисунок 2 – Графики изменения информативных параметров в зависимости от величины циклической наработки для образца без сварного шва. Значения информативных параметров и количества циклов нормированы.

Для частоты зондирования $f=60$ кГц (рисунок 2а) показано, что параметр NCC имеет стабильный нисходящий тренд на протяжении всего испытания, а после появления трещины начинает снижаться значительно быстрее. Графики значения огибающей (MaxEnv) и дисперсии (μ_2) характеризуются наличием локальных максимумов и минимумов, связанных с протекающими в объеме образца структурными изменениями, которые влияют 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 изменения информативных параметров для частоты $f=350$ кГц (рисунок 2б) имеют характерные экстремумы при величине наработки 20% и 60%. Изменения

характера поведения информативных параметров на этих величинах наработки выявляется также при низкой частоте зондирования, но выражено не столь явно.

Для образцов со сварным швом на частоте зондирования $f=60$ кГц (рисунок 3а) все три параметра демонстрируют плавное монотонное изменение; при этом момент зарождения небольшой трещины отражается на характере изменения параметров NCC и MaxEnv только после $N=58\ 000$ циклов (70%), тогда как μ_2 практически сразу начинает увеличиваться с большей скоростью.

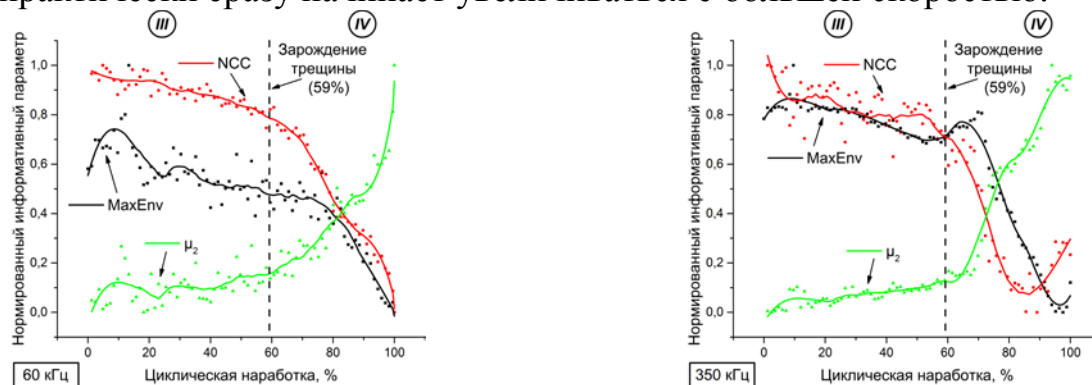


Рисунок 3 – Графики изменения информативных параметров в зависимости от величины циклической наработки для образца *со сварным швом*. Значения информативных параметров и количества циклов нормированы.

На частоте УЗ-контроля $f=350$ кГц (рисунок 3б) зарождение трещины выявляется акустическим методом, что приводит к изменению характера поведения информативных параметров после наработки $N=50\ 000$ циклов (60%).

Результаты оптического мониторинга образца без сварного шва (рисунок 4) показали, что локализация деформации в центральной части, возникающая на наработке $N=94\ 000$ циклов (95%), свидетельствует о зарождении усталостной трещины, что также отражается на графиках информативных параметров.

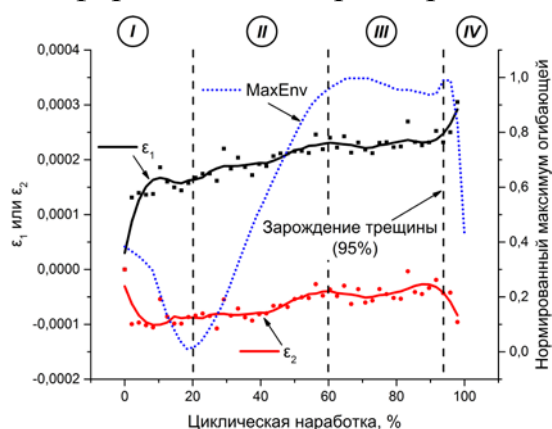
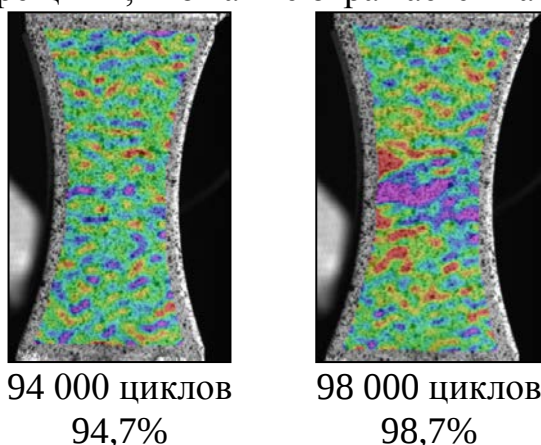


Рисунок 4 – Образец *без сварного шва*. Слева – поля деформаций ε_1 , полученные методом корреляции цифровых изображений при различной величине циклической наработки. Справа – график зависимости главных деформации ε_1 и ε_2 от величины циклической наработки.

Для образца со сварным швом (рисунок 5) усталостная трещина зарождается при величине наработки примерно $N \approx 49\ 000$ - $52\ 000$ циклов (59-63%) и это приводит к более интенсивному изменению графиков информативных

параметров. При наработке $N=65\,000$ циклов (80%) зарождаются еще две трещины, а после $N=74\,000$ циклов (89%) скорость распространения трещин и изменения информативных параметров резко возрастают. В итоге одна из них становится магистральной – по ней проходит разрушение.

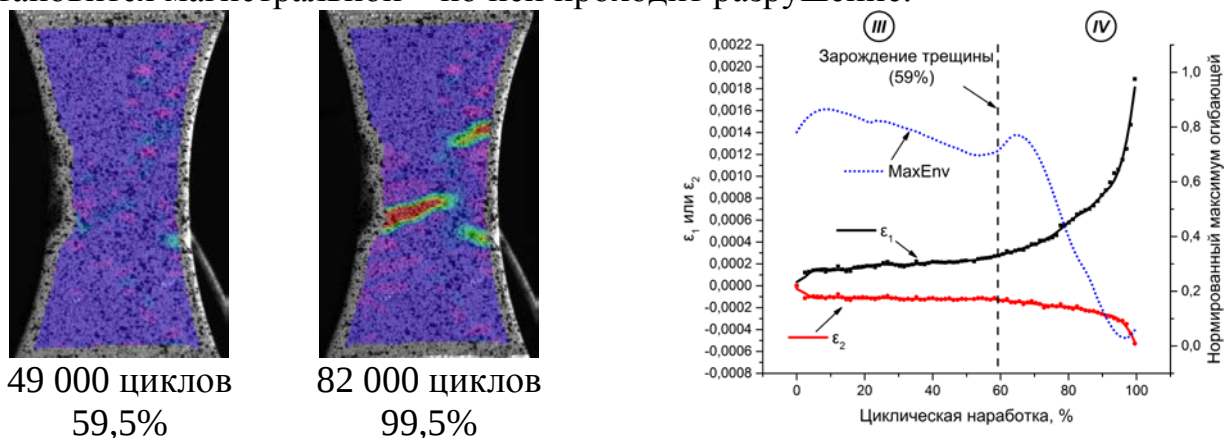


Рисунок 5 – Образец со сварным швом. Слева – поля деформаций ε_1 , полученные методом корреляции цифровых изображений при различной величине циклической наработки. Справа – график зависимости главных деформации ε_1 и ε_2 от величины циклической наработки.

Таким образом показано, что при тестировании ИМК на основе комбинированного оптико-акустического контроля путем анализа всех используемых информативных параметров и полей деформаций удастся достоверно выявить стадийность накопления повреждений, а также момент зарождения трещины. Стадии I и II – формирование микрповреждений в объеме материала; стадия III – рост и слияние микротрещин; стадия IV – зарождение и распространение магистральной трещины.

В первой части **третьей главы** проведено тестирование методики управления процессом роста усталостной трещины путем приложения периодических циклов перегрузки и разгрузки с последующим фрактографическим анализом на Растровом Электронном Микроскопе (РЭМ). Теоретически обосновано и экспериментально продемонстрировано различное поведение трещины после приложения к образцу циклов различной амплитуды и последовательности.

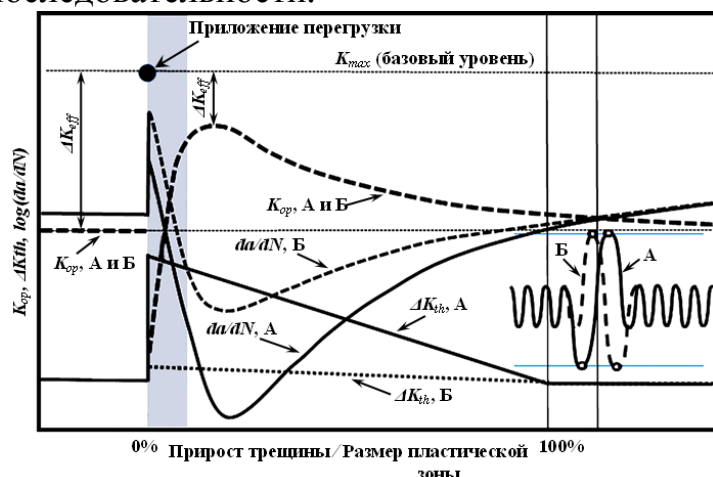


Рисунок 6 – Данные аналитического расчета изменения ключевых параметров роста трещины после перегрузки и разгрузки по двум схемам (А) и (Б).

Результаты расчета параметров роста трещины после приложения циклов «разгрузки-перегрузки» (схема А) и «перегрузки-разгрузки» (схема Б) на основе моделей О. Уиллера, Дж. Уилленборга, В. Эльбера и Р. Сундера показаны на рисунке 6. Скорость роста трещины зависит от возникающих остаточных напряжений вблизи ее вершины, что оказывает непосредственное влияние на величину порогового коэффициента интенсивности напряжений (ΔK_{th}): данный параметр резко возрастает после перегрузки и линейно снижается в процессе последующего роста трещины. Приложение цикла разгрузки после перегрузки позволяет «снять» остаточные сжимающие напряжения и снизить величину ΔK_{th} . Второй важный параметр – уровень закрытия трещины, который определяет эффективный диапазон изменения коэффициента интенсивности (ΔK_{eff}).

После приложения цикла перегрузки вершина трещины затупляется, поэтому уровень ΔK_{eff} резко возрастает. Однако по мере прорастания трещины её вершина «заостряется», а сформированная перегрузкой зона пластических деформаций усиливает эффект закрытия трещины (снижая ΔK_{eff}), что приводит и к снижению скорости её распространения.

Экспериментально продемонстрировано (рисунок 7), что приложение цикла перегрузки, предшествующего разгрузке (блоки 3,4), и цикла перегрузки, следующего за разгрузкой (блоки 1,2), приводят к различному расстоянию, на которое проросла трещина за одинаковое количество «базовых» циклов. В блоках 1 и 2, несмотря на различное количество приложенных циклов (2500 и 10000 циклов), трещина проросла на равное расстояние (4 мкм) и остановилась. В случае блоков нагружения 3 и 4 трещина проросла пропорционально количеству приложенных циклов на 5 и 20 мкм соответственно.

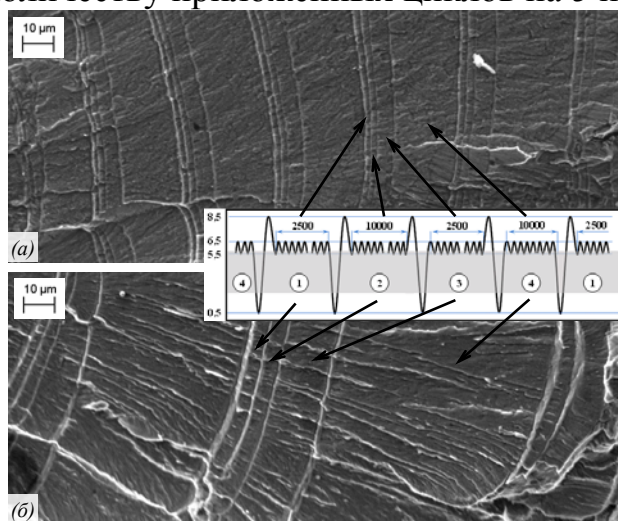


Рисунок 7 – РЭМ фрактограммы поверхности излома образца для двух длин трещины:

(а) $a=11$ мм, $r_y = 110$ мкм;

(б) $a=21,8$ мм, $r_y = 250$ мкм;

r_y – размер пластической зоны в условиях плоского деформированного состояния.

Совокупность полученных экспериментальных результатов по данным РЭМ-фрактографического анализа подтверждает работоспособность и корректность методики управления процессом роста усталостной трещины за счет приложения циклов перегрузки и разгрузки.

Однако, фрактографический анализ позволяет проводить только косвенные измерения информативных параметров и только после разрушения материала. В связи с этим, во второй части главы ставится задача по разработке оптического метода измерения параметров роста усталостной трещины в терминах механики

разрушения в процессе испытаний. Для этого необходимо разработать автоматизированный лабораторный исследовательско-диагностический комплекс (ЛИДК), который должен удовлетворять следующим требованиям:

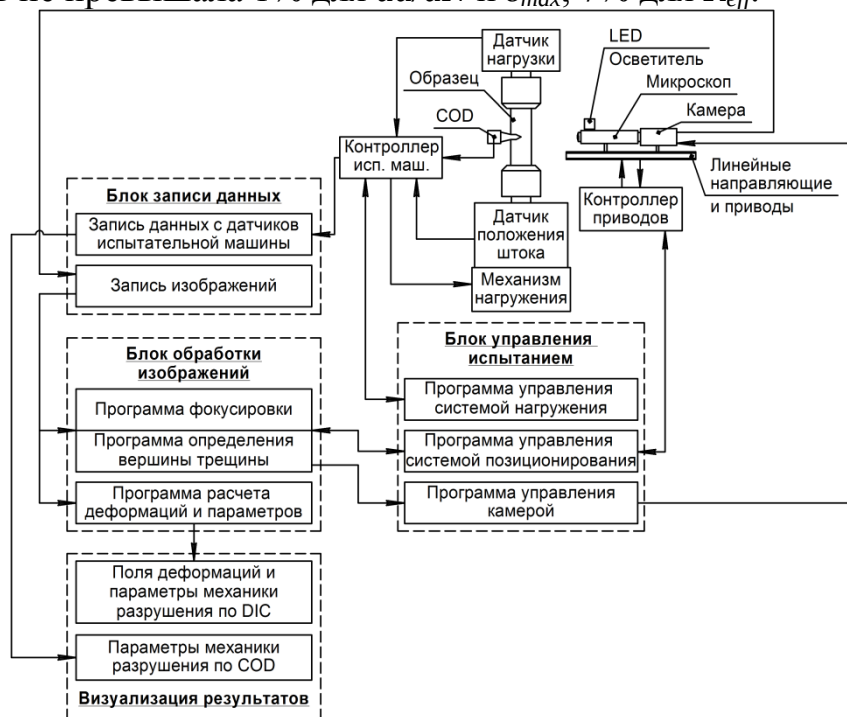
- 1) управление процессом циклического нагружения в автоматизированном режиме на основании заданных пользователем параметров с возможностью реализации сложных последовательностей нагружения в рамках предложенной методики управления ростом усталостной трещины;
- 2) проведение фотографирования поверхности образцов в режиме макро- и микросъемки 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 в область, соответствующую вершине распространяющейся трещины;
- 4) Осуществлять расчет полей деформаций по оптическим изображениям поверхности нагружаемого образца по данным, получаемым методом корреляции цифровых изображений с последующей оценкой параметров роста трещины в терминах механики разрушения.

Разработана принципиальная схема комплекса (рисунок 8а), который включает три функциональные системы, отвечающих за: (1) реализацию процесса нагружения с регистрацией тензоданных, показаний датчика раскрытия, а также обработку и визуализацию параметров роста трещины; (2) позиционирование оптической системы в пространстве – слежение за трещиной и фокусировку; (3) регистрацию и обработку оптических изображений поверхности, расчет полей деформации, параметров роста трещины и их визуализацию.

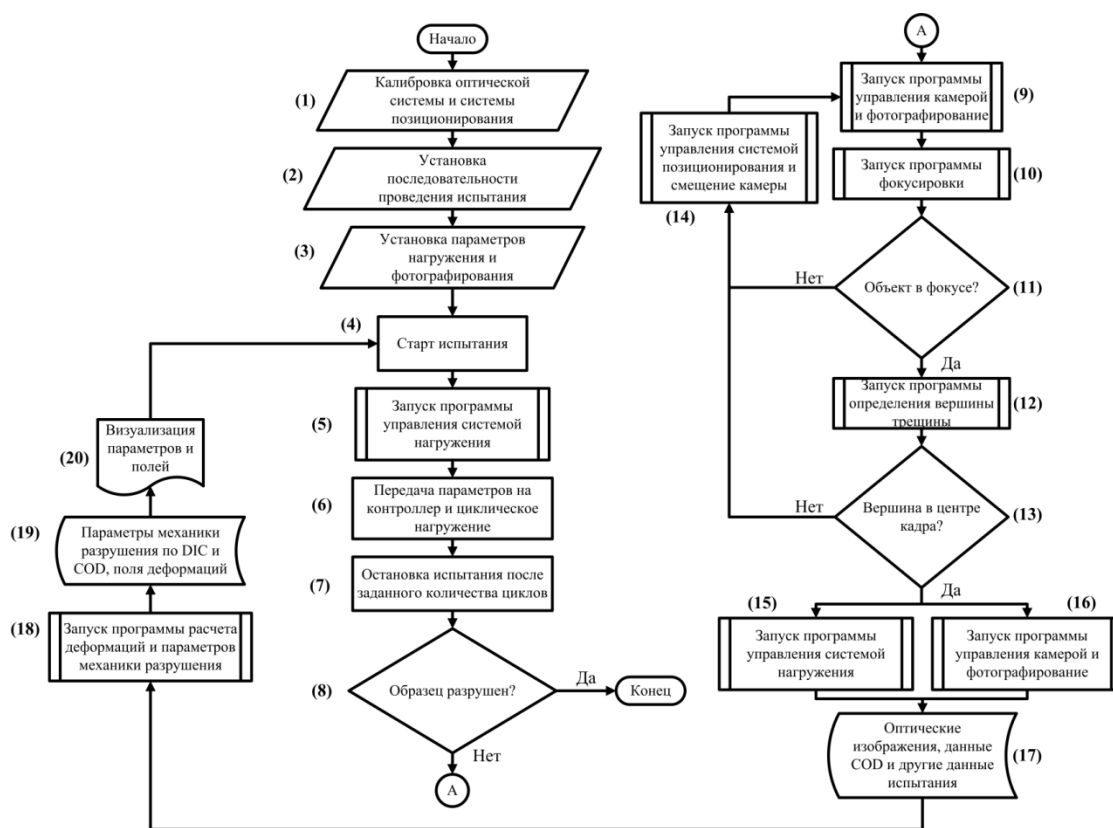
Алгоритм работы ЛИДК изображен в виде схемы на рисунке 8б. Перед началом испытания оператором проводится калибровка оптической системы и системы позиционирования, а также установка параметров нагружения. Затем производится запуск процесса испытаний (Блоки 1-4), после чего ЛИДК переходит на работу в автоматическом режиме. При этом осуществляется процесс нагружения с проверкой целостности образца (Блоки 5-8). Далее выполняется автоматическая фокусировка (Блоки 9-11, Блок 14); после этого определяется положение вершины трещины и позиционирование оптической системы (Блоки 12-14) с повторной фокусировкой (при необходимости) и проверкой условия положения вершины трещины в центре кадра. Затем запускается цикл нагружения с одновременной регистрацией изображений поверхности образца (Блоки 15-17) и последующим расчетом информативных параметров в терминах механики разрушения (Блоки 18-20). Условием завершения испытания является разрушение образца. Аппаратная часть ЛИДК реализована на базе сервогидравлической испытательной машины BISS Nano 15kN, цифровой камеры Basler piA2400-17gc, оптического микроскопа Альтами MB0670Д, трех линейных моторизированных направляющих с шаговыми двигателями Purelogic.

ЛИДК позволяет производить расчет следующих информативных параметров (в терминах механики разрушения): скорость роста усталостной трещины da/dN (где a – длина усталостной трещины, а N – количество циклов

нагружения); площадь петли механического гистерезиса в координатах нагрузка-деформация; максимальное значение деформации (ε_{max}), определяемое при помощи программного экстензометра; эффективная асимметрия цикла (R_{eff}). В предварительных тестовых испытаниях средняя ошибка расчета информативных параметров не превышала 1% для da/dN и ε_{max} ; 7% для R_{eff} .



(a)



(b)

Рисунок 8 – Схема ЛИДК для оценки параметров роста трещины в терминах механики разрушения с использованием DIC (a) – принципиальная схема, (b) – схема алгоритма.

На рисунке 9 изображены результаты тестирования ЛИДК при испытании с приложением единичного цикла перегрузки в виде зависимости двух информативных параметров (скорости роста трещины и эффективной асимметрии цикла) от расстояния, на которое трещина проросла в пластическую зону, вызванную перегрузкой. Продемонстрировано, что предложенный набор информативных параметров и 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 неоднородного циклического нагружения.

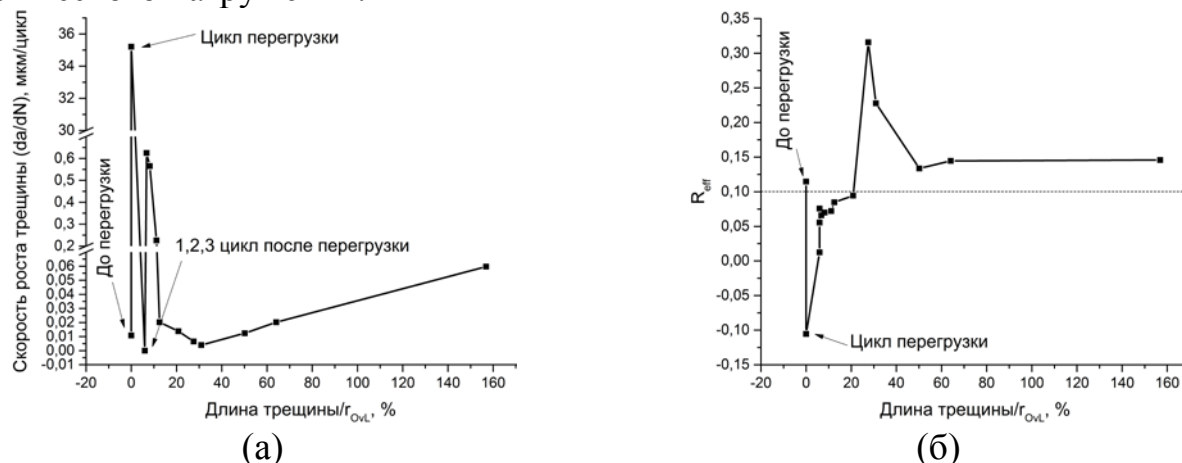


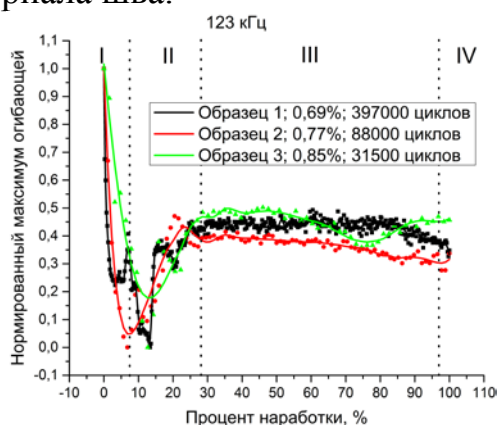
Рисунок 9 – График зависимости скорости роста трещины (da/dN) и эффективной асимметрии цикла (R_{eff}) в зависимости от расстояния, на которое трещина проросла в пластическую зону, вызванную перегрузкой.

В четвертой главе иллюстрируются возможности применения разработанных в рамках диссертационной работы методов и комплексов для решения прикладных задач оценки состояния конструкционных материалов: стеклопластиковых композитов, углепластиковых сэндвич-панелей и высокопрочных титановых сплавов со сварным соединением.

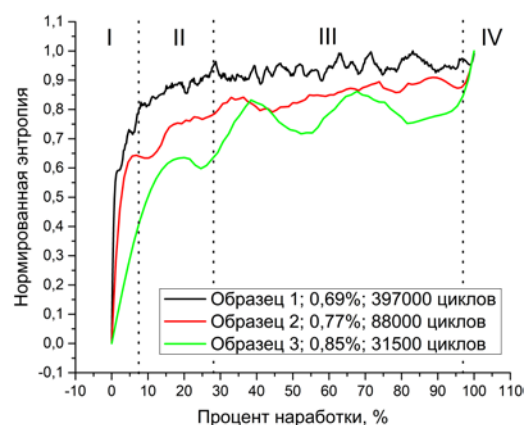
Мониторинг состояния стеклопластиков проводился в рамках трехстороннего научно-технического сотрудничества между ИФМП СО РАН (Россия), компаниями LM (Дания) и BiSS (Индия). Результаты комбинированного оптико-акустического мониторинга (рисунок 10а, б) позволили выявить основные стадии разрушения: 1) растрескивание матрицы, 2) формирование локальных расслоений, 3) их последующий рост и 4) финальное разрушение.

В рамках НИР с ПАО «Компания Сухой» «ОКБ Сухого» проводили исследования по мониторингу состояния и оценке поврежденности трехслойных сэндвич-панелей из углепластика при помощи акустического контроля волнами Лэмба. Данные об изменении информативных параметров акустических сигналов представлены на рисунке 10в. Разработанный метод позволяет выявлять 4 характерные стадии процесса усталостного разрушения, когда на первой стадии развиваются процессы интенсивного накопления микрповреждений; на второй стадии – зарождение локализованных макродефектов; на третьей стадии – рост макродефектов; на четвертой стадии – лавинообразный рост макроповреждения.

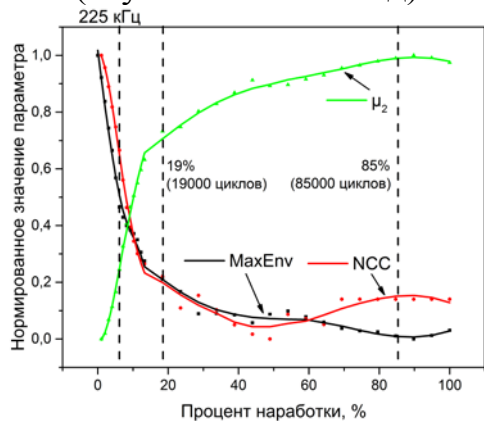
Также разработанные методики применяли для анализа усталостного разрушения образцов высокопрочного титанового сплава ВТ-23 с неразъемными соединениями, выполненными лазерной сваркой (совместно с ИТПМ СО РАН). Результаты оценки процессов роста усталостной трещины оптическим методом на основе данных, получаемых методом корреляции цифровых изображений (рисунок 10г) позволили установить, что повышение усталостной долговечности образцов со сварным швом после обработки ультразвуковой механической ковкой происходит за счет изменения условий зарождения и распространения трещины, связанных с уменьшением величины возникающих в материале деформаций за счет снятия остаточных напряжений, а также снижения дефектности структуры материала шва.



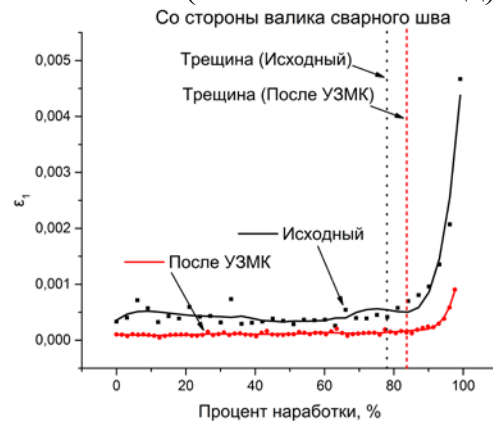
(а) MaxEnv для образцов стеклопластикового композита (акустический метод)



(б) информационная энтропия для образцов стеклопластикового композита (оптический метод)



(в) информативные параметры акустических сигналов для образцов углепластиковых сэндвич-панелей



(г) деформация ε_1 при разрушения образцов титанового сплава, рассчитанная методом DIC

Рисунок 10 – Графики изменения информативных параметров, полученные в рамках решения различных прикладных научных задач (а-г).

Таким образом, в главе проиллюстрирована возможность с помощью разработанных аппаратно-программных комплексов и методов получать достоверную оценку состояния конструкционных материалов с выявлением характерных стадий накопления повреждений, зарождения и распространения трещин и разрушения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

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 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 (μ_2); в оптическом методе на основе данных, получаемых методом DIC – главных деформаций ε_1 и ε_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 микрповреждений 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 (структурных 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 (ε_{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 и разрушения, соответствующие: 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, характерные для волокнистых композитов, на основе рассчитываемых информативных параметров и их первых производных. Отличие выявленных стадий от указанных в п. 4а (для стеклопластиковых материалов) заключается в различной величине наработки, при которой происходит переход от одной стадии к другой.

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.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах, входящих в Перечень ВАК

1. Бурков М.В., **Еремин А.В.** и др. Примерение ультразвукового метода с использованием волн Лэмба для контроля состояния алюминиевых сплавов. Ч. 1. Статические механические испытания // Известия высших учебных заведений. Физика. **2015.** Т. 58, № 6/2. С. 25–31.
2. Бурков М.В., **Еремин А.В.** и др. Примерение ультразвукового метода с использованием волн Лэмба для контроля состояния алюминиевых сплавов. Ч. 2. Циклические механические испытания // Известия высших учебных заведений. Физика. **2015.** Т. 58, № 6/2. С. 31–36.

3. **Еремин А.В.** и др. Разработка акустико-оптического метода контроля состояния композиционных материалов при циклических испытаниях // Известия высших учебных заведений. Физика. **2016**. Т. 59, № 7/2. С. 49–55.
4. Бурков М.В., **Еремин А.В.** и др. Применение ультразвуковой методики с использованием волн Лэмба для контроля состояния образцов алюминиевого сплава В96цЗТ // Дефектоскопия. **2017**. Т. 12. С. 3–15.

В журналах, индексируемых в WoS и Scopus

1. **Eremin A.**, Sunder R., Panin S. Application of digital image correlation for estimation of fatigue crack closure level // AIP Conference Proceedings. **2016**. Vol. 1785. – 030008.
2. Burkov M.V., **Eremin A.V.** et al. Lamb wave based ultrasonic technique for AA2024 fatigue evaluation // Key Eng. Mater. **2016**. Vol. 685. P. 399–402.
3. **Eremin A.V.** et al. Investigation of Acoustic Parameters for Structural Health Monitoring of Sandwich Panel under Cyclic Load // Key Eng. Mater. **2016**. Vol. 712. P. 319–323.
4. Sunder R., **Eremin A.** et al. Synergy of crack closure, near-tip residual stress and crack-tip blunting in crack growth under periodic overloads – A fractographic study // Int. J. Fatigue. **2016**. Vol. 93. P. 18–29.
5. Sunder R., **Eremin A.** et al. Combined action of crack closure and residual stress under periodic overloads: A fractographic analysis // Int. J. Fatigue. **2016**. Vol. 82. P. 667–675.
6. Panin S., **Eremin A.** et al. Numerical and Experimental Study of Strain Localization in Notched Specimens of a Ductile Steel on Meso- and Macroscales // Adv. Eng. Mater. **2016**. Vol. 18, № 12. P. 2095–2106.
7. **Eremin A.** et al. Application of a Lamb waves based technique for structural health monitoring of GFRP under cyclic loading // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. **2016**. Vol. 124. - 012084.
8. Burkov M.V., **Eremin A.V.** et al. Mechanical state assessment using lamb wave technique in static tensile tests // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. **2016**. Vol. 156. – 012009.
9. **Eremin A.** et al. DIC Study of Fatigue Crack Growth after Single Overloads and Underloads // Procedia Struct. Integr. Elsevier B.V., **2017**. Vol. 5. P. 889–895.
10. Smirnova A., **Eremin A.** et al. The effect of advanced ultrasonic forging on fatigue fracture mechanisms of welded Ti-6Al-4V alloy // Proceedings of the International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures 2017. AIP Conference Proceedings, **2017**. Vol. 1909. – 020206.

Свидетельства на программы для ЭВМ

1. Чемезов В.О., Любутин П.С., Титков В.В., **Еремин А.В.**, Панин С.В. Программа определения положения трещины и координат ее вершины по оптическому потоку и пространственной информации. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017611355. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 02.02.**2017**.
2. Любутин П.С., Бурков М.В., Бяков А.В., **Еремин А.В.**, Панин С.В. Программа для локации повреждений в композиционных материалах с помощью сети распределенных датчиков с использованием волн Лэмба. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2018616605. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 04.06.**2018**.