

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ПРОЧНОСТИ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИФПМ СО РАН)

Лаборатория механики полимерных композиционных материалов

Допустить к представлению
научного доклада об основных
результатах подготовленной
научно-квалификационной
работы (диссертации) в ГЭК
Зав. лабораторией МПКМ



С.В. Панин

« 13 » июня 2018

**МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
И АРМИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ
ПРИ УСТАЛОСТНОМ РАЗРУШЕНИИ
ОПТИЧЕСКИМ И АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДАМИ**

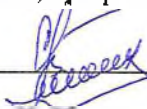
Научный доклад об основных результатах подготовленной
научно-квалификационной работы (диссертации)
по направлению подготовки 22.06.01 Технологии материалов

Научный доклад об основных результатах
подготовленной научно-квалификационной
работы (диссертации) представлен

« 13 » июня 2018

Научный руководитель

д.т.н., профессор, зав. ЛМПКМ

 С.В. Панин

Председатель ГЭК

д.т.н., профессор,
профессор кафедры материаловедения и
машиностроения НГТУ

Ученая степень, звание, должность председателя ГЭК

 Батаев В.А.
Подпись ФИО

Автор работы

аспирант лаборатории МПКМ

 А.В. Еремин

ТОМСК 2018

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

Процессы усталостного разрушения и деградации свойств материалов играют существенную роль в причинах выхода из строя деталей машин и элементов конструкций. Вопросы контроля имеют особое значение в области авиации и безопасности полетов. В отчете международной организации гражданской авиации среди причин авиационных происшествий большую долю играют механические повреждения, получаемые в процессе стоянки, взлета/посадки и непосредственно в полете, что составляет 77% от общего числа авиационных происшествий.

При этом самолет, получивший повреждения, должен пройти внеплановый контроль, в результате которого оценивается размер повреждения, его критичность, а также остаточная прочность конструкции. Поэтому актуальной научно-технической проблемой является разработка новых подходов к контролю дефектности изделий, что позволит существенно повысить безопасность и сократить экономические издержки.

Перспективным и интенсивно развивающимся подходом является концепция мониторинга структурной целостности конструкции (или Structural Health Monitoring). Сеть датчиков регистрирует физические параметры, после чего производится их обработка и анализ, что позволяет сделать выводы о механическом состоянии и дефектности объекта контроля, тем самым существенно повышая безопасность и сокращая экономические издержки.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработка и тестирование лабораторных программно-аппаратных комплексов для оценки состояния 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 структурные схемы и алгоритмы работы двух автоматизированных комплексов для комбинированного оптико-акустического контроля и для расчета параметров роста трещины в терминах механики разрушения.
2. Предложить информативные параметры акустических сигналов и оптических изображений, для целей характеристики механического состояния.
3. Разработать методику управления процессом роста усталостной трещины в металлических сплавах, применяемую при оценке параметров роста трещины.
4. Провести тестирование разработанных комплексов на примере решения прикладных научных задач.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ НАГРУЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМБИНИРОВАННОГО АКУСТИКО-ОПТИЧЕСКОГО МЕТОДА

Разработана принципиальная схема комплекса, представленная на рисунке 1. На схеме показаны аппаратные и программные части комплекса и схема их взаимодействия. Различными цветами показаны три системы, различного функционального назначения:

- зеленым цветом – система, отвечающая за процесс нагружения и состоящая из испытательной машины, а также программные средства для управления испытанием.

- сиреневым цветом отмечена система для проведения ультразвукового мониторинга, включающая приборы для генерации и регистрации зондирующего акустического сигнала, а также программы управления мониторингом, записи, обработки сигналов с расчетом информативных параметров и визуализации результатов расчетов.



Рисунок 1 – Функциональная схема разработанного комплекса для мониторинга состояния материалов с использованием комбинированного акустико-оптического метода.

- красным цветом показана система для оптического мониторинга, состоящая из цифровой камеры и осветителя, а также программных средств управления съемкой, запись изображений, обработки и визуализации.

Для имеющейся функциональной схемы разработан алгоритм работы, показанный в виде блок-схемы на рисунке 2.

На первых трех этапах оператор задает необходимые параметры испытания/мониторинга, затем производится запуск испытания. В дальнейшем процесс автоматизирован и не требует участия оператора. В автоматическом режиме происходит параллельная запись акустических сигналов и оптических изображений. Затем запускается циклическое нагружение, одновременно с которым происходит обработка полученных ранее данных – расчет информативных параметров и их визуализация. После достижения заданного числа циклов нагружение останавливается. Если образец не разрушен, то вновь выполняется комбинированный мониторинг с последующим циклическим нагружением до тех пор, пока образец не разрушится.

Реализация разработанного ИМК выполнена с использованием следующих аппаратных средств: в качестве системы нагружения выступает сервогидравлическая испытательная машины BISS UTM 150. Для фотогравирования используется камера Canon EOS 700D и отдельный осветитель. Акустический контроль реализован на основе 2-х канального цифровой осциллографа с функцией генератора Handyscope HS5, а в качестве приемников-передатчиков УЗ сигналов через образец применяются керамические ПЭП на стальной подложке.

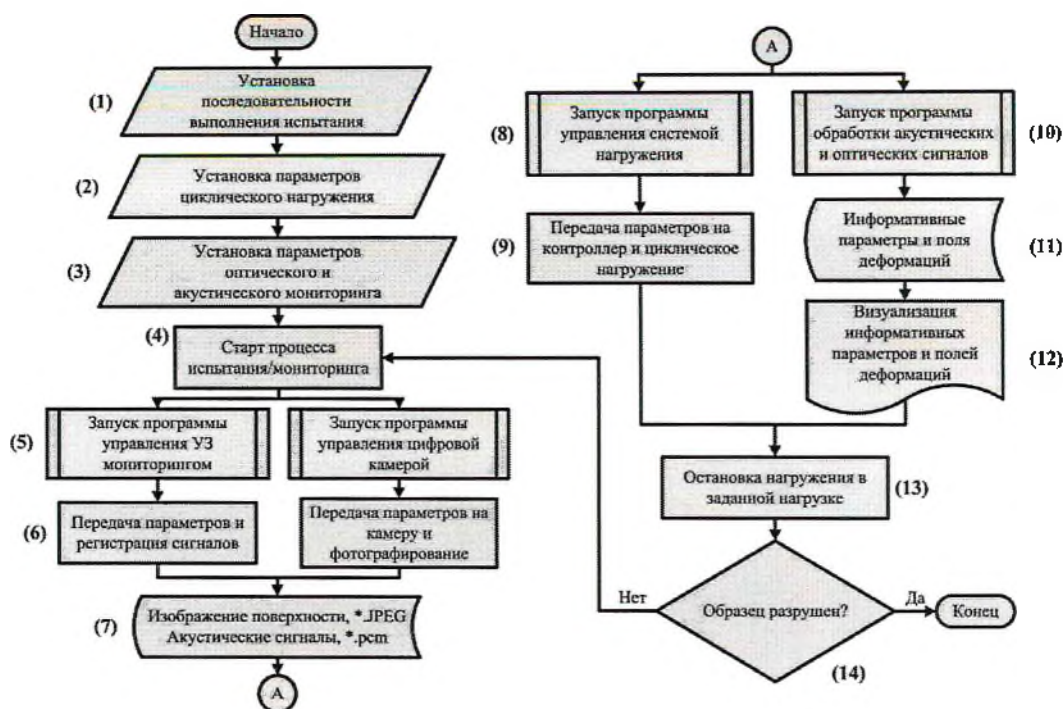


Рисунок 2 – Алгоритм работы комплекса для мониторинга состояния материалов с использованием комбинированного акустико-оптического метода.

Тестирование комплекса проведено на примере усталостного разрушения образцов высокопрочного алюминиевого сплава В96 в виде лопаток двух типов (рисунок 3): образцы в исходном состоянии (без сварного шва), и образцы со сварным соединением. Регистрация оптических и акустических данных проводилась при максимальной нагрузке в цикле каждые $\Delta N=2000$ циклов.

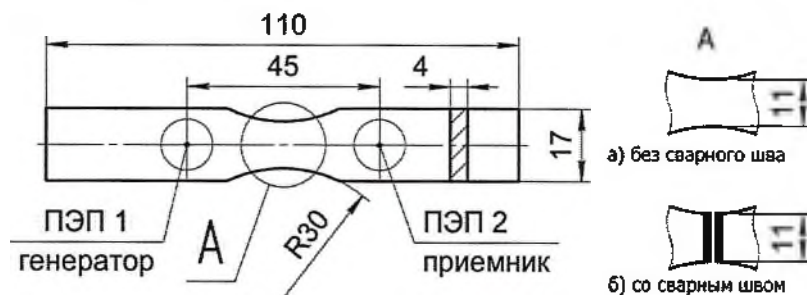


Рисунок 3 – Образец высокопрочного алюминиевого сплава В96 в виде лопаток двух типов: (а) без сварного соединения и (б) со сварным швом.

В качестве информативных параметров оптического мониторинга выбраны главные деформации ϵ_1 и ϵ_2 , графики изменения которых по мере увеличения наработки представлены на рисунке 4. Вертикальными линиями показаны стадии процесса разрушения, определяемые при анализе результатов комбинированного акустико-оптического мониторинга. Видно, что появление трещины приводит к более интенсивному изменению значений выбранных информативных параметров, однако чувствительность оптического метода на более ранних стадиях невысокая.

Для проведения акустического мониторинга первоначально определяются оптимальные частоты зондирующего сигнала путем построения амплитудно-частотной характеристики. Таким образом для проведения мониторинга выбраны частоты 60 кГц (где присутствует в основном A_0 мода) и 350 кГц (с основной модой S_0).

В качестве информативных параметров, позволяющих охарактеризовать процесс разрушения выбраны:

- Максимальное значение огибающей сигнала (MaxEnv), что, по сути, является максимумом амплитуды, и характеризует степень затухания сигнала.
- Нормированный коэффициент корреляции (NCC) между двумя сигналами (базовым и текущим), характеризующий степень «схожести» двух сравниваемых сигналов.
- Второй центральный момент (μ_2) разности двух сигналов (базового и текущего) или дисперсия, которая также характеризует степень отличия двух сравниваемых сигналов. Чем больше величина, тем больше разность между двумя сигналами.

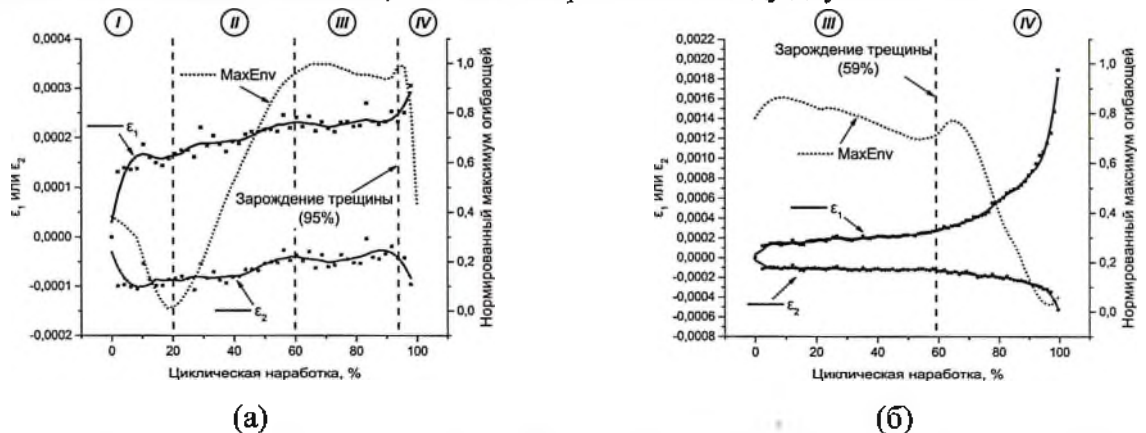


Рисунок 4 – Графики изменения информативных параметров оптического мониторинга – главные деформации ϵ_1 и ϵ_2 – для образцов без сварного соединения (а) и образцов со сварным соединением (б).

Для удобного сравнения информативных параметров между собой производится их нормировка от 0 до 1.

Результаты по изменению выбранных информативных параметров в процессе испытания представлены на графиках на рисунке 5 для частоты $f=350$ кГц. Для исходных образцов (без сварного соединения) можно выделить 4 стадии процесса разрушения, где на первых двух происходит формирование повреждений во всем объеме материала, на 3-й стадии происходит рост и слияние повреждений уже локализовано (в области минимального сечения), а четвертая стадия связана с ростом макротрещины. Для образца со сварным швом, стадии 1 и 2 отсутствуют, и процесс разрушения сразу начинается в области шва.

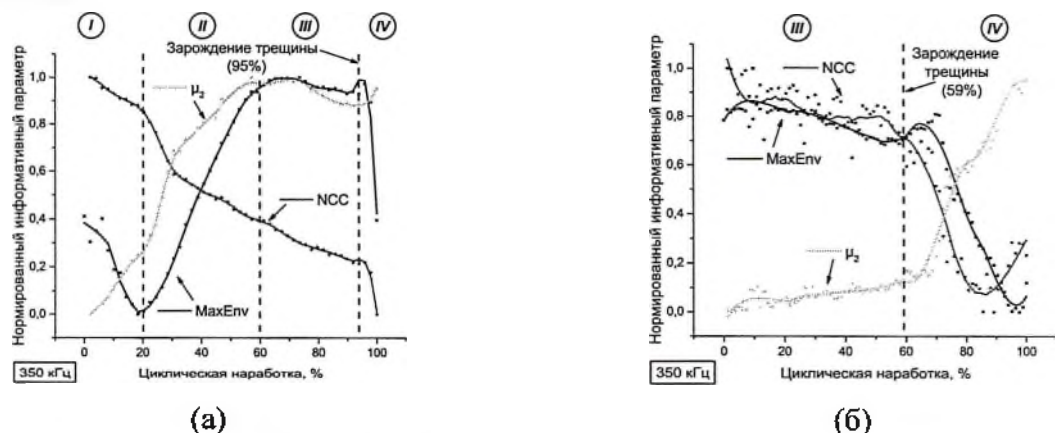


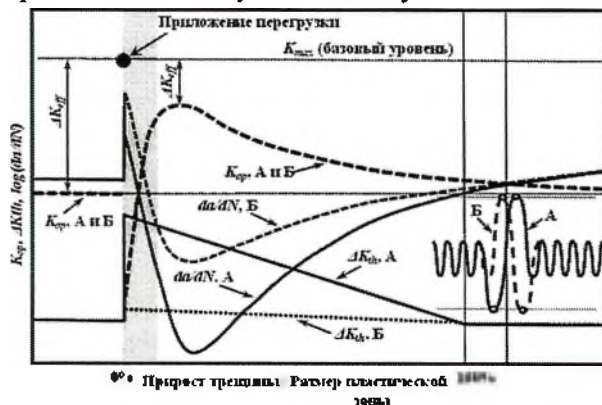
Рисунок 5 – Графики изменения информативных параметров акустического мониторинга для образцов без сварного соединения (а) и образцов со сварным соединением (б).

2. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

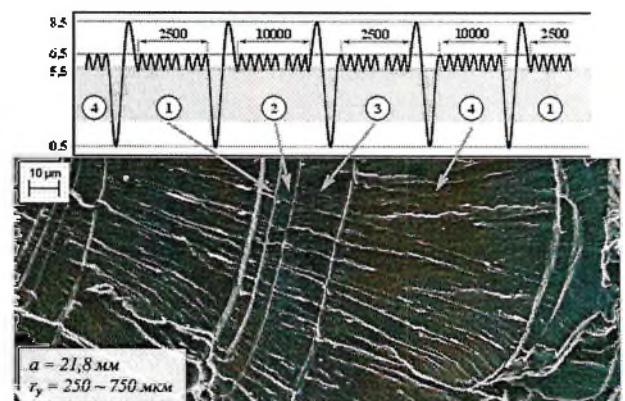
Результаты теоретических расчетов по изменению параметров роста усталостной трещины при неоднородном нагружении, выполненном по схеме А (когда после базового уровня нагружения следует сначала разгрузка, а потом перегрузка) и по схеме Б (когда перегрузка прикладывается перед разгрузкой) представлены на рисунке 6а.

Согласно аналитическим расчетам после приложения неоднородных циклов скорость роста трещины отлична для случаев А и Б. При схеме перегрузки по Б трещина растет быстрее. При этом параметр, связанный с закрытием трещины $K_{ор}$ или $\Delta K_{эфф}$, одинаковый для обеих схем нагружения, а разница в скорости вызвана увеличением пороговой величины $\Delta K_{пн}$. После того, как трещина прорастает определенное расстояние, влияние приложенных циклов неоднородного нагружения исчезает.

Для проверки имеющихся расчетных моделей были проведены усталостные испытания. На рисунке 6б представлено изображение поверхности излома и схема нагружения. На блоке нагружения №3 сначала идет перегрузка, а потом разгрузка. Непосредственно данный цикл оставляет на поверхности излома тонкую бороздку. Затем происходит рост трещины в течение 2500 циклов и на изломе отображается в виде полосы. После чего вновь прикладывается цикл перегрузки-разгрузки и циклическое нагружение на базовом уровне в течение 10 000 циклов. При этом соотношение длин, на которые проросла трещина в блоке №3 и блоке №4, равны 1:4, т.е. пропорционально прикладываемому количеству циклов.



(а)



(б)

Рисунок 6 – Графики изменения информативных параметров акустического мониторинга для образцов без сварного соединения (а) и образцов со сварным соединением (б).

В случае нагружения для блоков №1 и №2, где сначала была разгрузка, а потом перегрузка, длина, на которую проросла трещина, одинакова, что после 2500 базовых циклов, что после 10000. То есть можно с уверенностью утверждать, что трещина остановилась после удлинения на 4-6 мкм.

Таким образом, можно отметить, что перегрузка приводит к замедлению роста трещины или остановке, а разгрузка снимает остаточные напряжения и восстанавливает скорость роста после перегрузки. Теоретический расчет и экспериментальные испытания подтвердили работоспособность предлагаемой методики управления процессом роста усталостной трещины, основанной на приложении циклов перегрузки и разгрузки, приводящее к изменению уровня остаточных напряжений (σ^*), которые в свою очередь

изменяют величину (ΔK_{th}), и уровня закрытия трещины (ΔK_{eff}), корректность методики подтверждается совокупностью результатов ее тестирования по данным РЭМ-фрактографического анализа.

Полученные экспериментальные результаты требуют дальнейшей детализации, которая труднодостижима с использованием только РЭМ-фрактографического анализа, поэтому ставится вопрос об оценке параметров роста усталостной трещины в процессе нагружения при помощи метода корреляции цифровых изображений.

Для решения этой задачи разработана функциональная схема комплекса, а также алгоритм его работы, представленные на рисунках 7 и 8. Аналогично второй главе, на функциональной схеме цветом выделены различные функциональные системы:

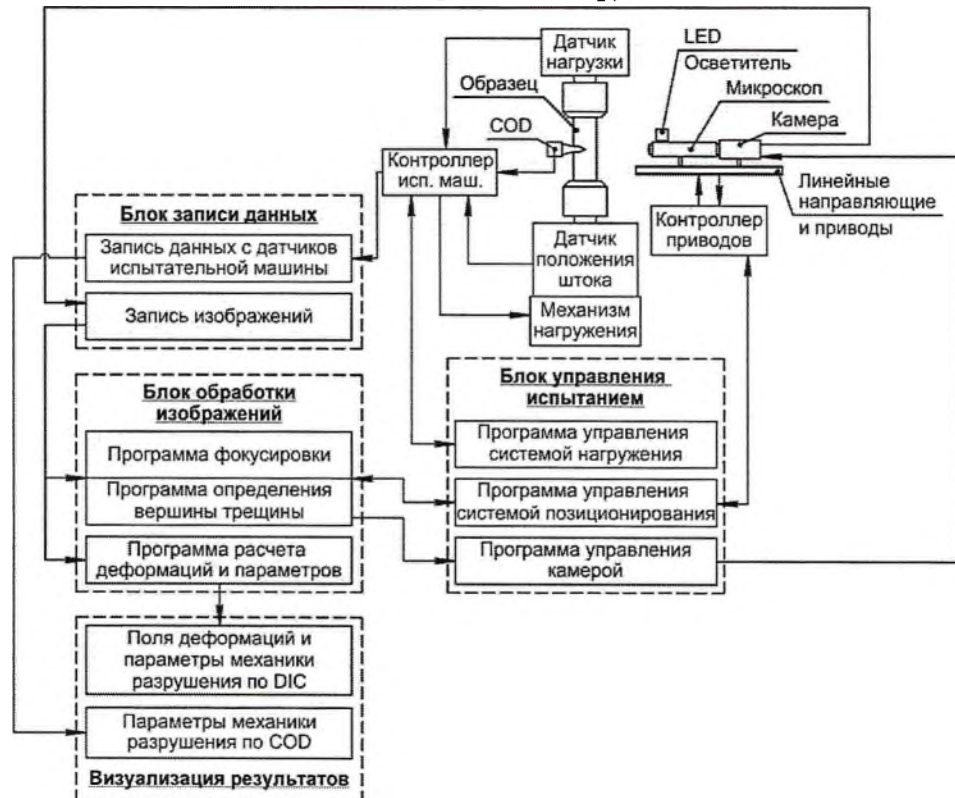


Рисунок 7 – Функциональная схема разработанного комплекса для оценки параметров роста усталостной трещины с использованием метода корреляции цифровых изображений.

- система, связанная с проведением испытания и нагружения (зеленый цвет).
- система для оптического мониторинга, состоящая из цифровой камеры, микроскопа и осветителя, а также программных средств управления съемкой и обработкой изображений.
- система позиционирования оптической системы для слежения за вершиной растущей усталостной трещины, включающей линейные направляющие и приводы, контроллер приводов, а также программы обработки изображений для осуществления фокусировки, определения вершины трещины и управления системой позиционирования.

Важной особенностью комплекса является реализация процесса позиционирования оптической системы – это необходимость обработки изображений с камеры для фокусировки, а затем задействование алгоритма поиска вершины трещины. И только после этого осуществляются необходимые измерения, когда изображения регистрируются в течение 1 полного цикла нагружения.

Аппаратная реализация комплекса включает в себя следующее: испытательная машина BISS Nano 15kN, цифровая камера Basler piA2400-17gc, микроскоп Альтами MB0670Д, три прецизионные линейные направляющие, оснащенные шаговыми электродвигателями Purelogic PL42HD48

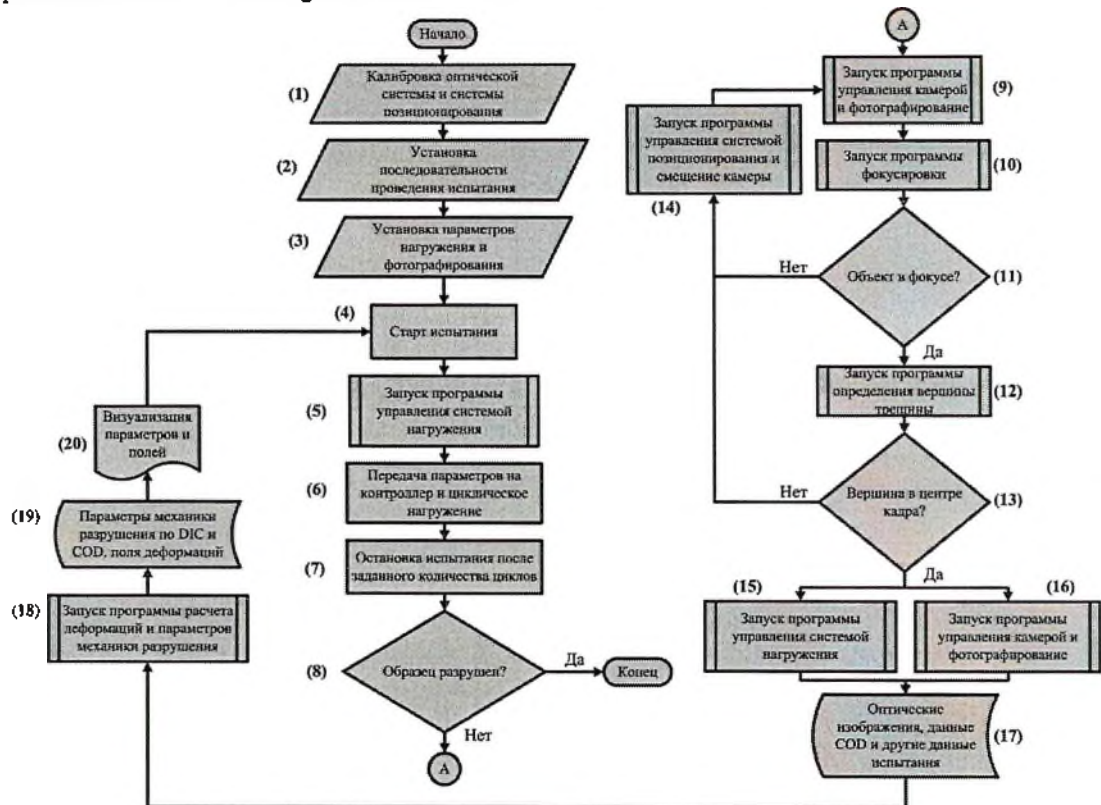


Рисунок 8 – Алгоритм работы комплекса для оценки параметров роста усталостной трещины с использованием метода корреляции цифровых изображений.

Для тестирования комплекса использовался плоский образец с боковым надпилем и предварительно выращенной усталостной трещиной. Схема нагружения в испытании, представленная на рисунке 9, состояла из циклов базового уровня и единичного цикла перегрузки. Через заданные промежутки циклического нагружения или длины трещины производилась запись изображений в течение полного цикла.

Процедура оценки параметров механики разрушения происходит следующим образом:

1. Полученная серия изображений вершины трещины обрабатывается и использованием метода корреляции цифровых изображений и рассчитываются векторные поля и поля деформаций.
2. Затем в области вершины трещины устанавливается программный экстензометр и производятся замеры величины деформации в этой области. График получаемых данных в координатах нагрузка-деформация является петлей механического гистерезиса.
3. На основе петли механического гистерезиса рассчитываются такие параметры как максимальная величина деформаций, эффективная асимметрия цикла (фактически закрытие трещины), а также общая площадь петли, характеризующая энергию деформации.

На графике на рисунке 10 представлена зависимость скорости роста трещины при её продвижении в пластическую область, вызванную приложением цикла перегрузки (размер пластической зоны r_{0VL}). Скорость роста определялась напрямую по изображению поверхности. А рисунке 11а – изменение величины ε_{max} . Непосредственно в цикле

перегрузки трещина прорастает на несколько десятков микрон, а также существенно возрастают деформации. После чего, происходит падение, как скорости, так и величины деформаций, достигая минимума после на 20–30% от величины пластической зоны. Примерно на 70% от r_{OVL} влияние перегрузки становится практически незаметным.

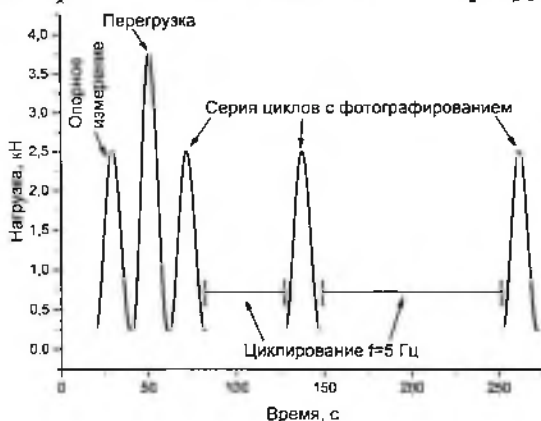


Рисунок 9 – Схема нагружения алюминиевого образца Д16Т в испытании с единичной перегрузкой, содержащая базовый уровень нагружения и перегрузку.

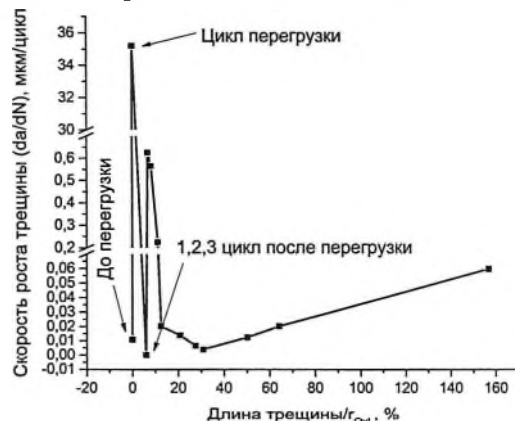
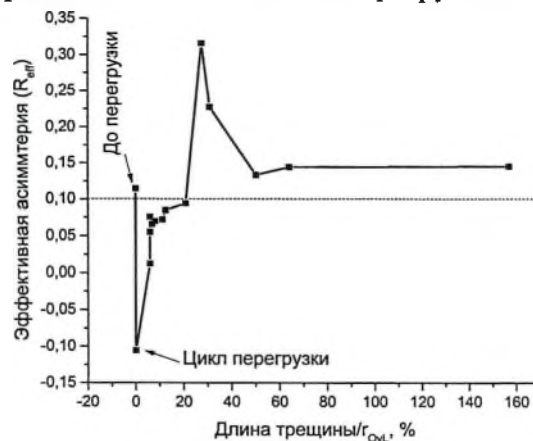


Рисунок 10 – График зависимости скорости роста трещины при её продвижении в пластическую область, вызванную приложением цикла перегрузки.

На рисунке 11б представлено изменение эффективной асимметрии цикла, что, по сути, является характеристикой уровня закрытия трещины. Уровень $R_{eff}=0,1$ является асимметрия базового цикла нагружения. При перегрузке вершина трещины «притуляется» и закрытие отсутствует, однако затем уровень закрытия быстро возрастает за счет процесса заострения вершины и сжимающего действия окружающего трещину пластически деформированного материала, достигая максимума на 30% r_{OVL} . После чего снижается, восстанавливая значения близкие к начальным. Полученные результаты согласуются с выводами экспериментальных результатов, полученных по данным фрактографического анализа, а также с представлениями механики разрушения.



(а)



(б)

Рисунок 11 – Графики изменения информативных параметров процесса роста усталостной (а) и образцов со сварным соединением (б).

3. ТЕСТИРОВАНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ПРИМЕРЕ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ НАУЧНЫХ ЗАДАЧ

Первая практическая задача решалась в рамках трехстороннего сотрудничества между ИФПМ СО РАН и компаниями BISS и LM wind power. Необходимо адаптировать

имеющуюся методику для мониторинга состояния стеклопластиковых композитов в процессе циклического нагружения. Оптический метод корреляции цифровых изображений не очень эффективен для композиционных материалов. Однако особенностью данного композита является его полупрозрачная структура и возможность оценки изображения поверхности по изменению информационной энтропии и среднеквадратичного отклонения уровней яркости. Акустический контроль остался в оригинальном виде, разработанном в разделе 2.

В результате комплексного анализа полученных тензометрических, акустических и оптических данных выделены и описаны 4 стадии процесса усталостного разрушения стеклопластикового композиционного материала: 1) зарождение микродефектов; 2) слияние микрповреждений и формирование макродефектов, 3) рост расслоений и 4) финальное разрушение.

Решение второй практической задачи одушевлялось в рамках договора с ОКБ Сухого по мониторингу состояния углепластиковых композиционных материалов по данным акустического контроля. Показано, что акустический мониторинг позволил определить 4 основные стадии процесса разрушения основываясь на расчете, как информативных параметров, так и их первых производных.

Третья работа состояла в оценке усталостного разрушения образцов титанового сплава вт-23 со сварными соединениями, выполненными лазерной сваркой. Сварные соединения представлены в двух состояниях: без обработки, а также подвергнутые УЗМК, которая должна снимать остаточные напряжения после сварки.

Оценка общего числа циклов, а также длины трещины показывает, что обработка повышает общее количество циклов до разрушения с 17 до 32 тыс. Также смещается и момент зарождения трещины, как в абсолютных числах, так и в процентах от наработки. Кроме того, оценка деформаций методом DIC показывает, что их средний уровень снижается после обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В рамках НКР были разработаны два комплекса для мониторинга состояния металлических и армированных полимерных композиционных материалов в процессе циклического нагружения. Предложен и протестирован набор информативных параметров для оценки механического состояния и степени поврежденности конструкционных материалов, а также методики их расчетов при обработке данных, регистрируемых при проведении комбинированного акустического и оптического мониторинга. Кроме того, проведено тестирование разработанных комплексов при решении прикладных научных задач. По результатам работы сделаны следующие выводы:

1) В результате тестирования комплекса для комбинированного акустико-оптического контроля на образцах алюминиевого сплава со сварными швами оптический метод позволил визуализировать появление трещины на полях деформаций ϵ_1 после $N=94\ 000$ циклов (94,7%) для образца без сварного шва и после $N=49\ 000$ циклов (59%) для образца со сварным швом, а также момент зарождения трещины определяется по графикам изменения информативных параметров оптического мониторинга ϵ_1 и ϵ_2 . Однако, оптический метод не является в достаточной степени чувствительным к процессам, протекающим на начальных этапах. При использовании акустического мониторинга установлены оптимальные частоты волн Лэмба для данной конфигурации, соответствующие $f=60$ кГц и $f=350$ кГц. Метод оценки состояния на основе расчета информативных параметров принимаемых акустических сигналов также является

чувствительным к моменту зарождения трещины. Однако, если для образцов без сварных швов момент зарождения трещины определяется на тех же величинах наработки, что и по оптическому мониторингу, то в случае образцов со сварными швами, на частоте $f=60$ кГц трещина оказывает влияние на поведение параметров только после 70% наработки. По итогам тестирования можно заключить, что все параметры позволяют достоверно оценивать процесс усталостного разрушения, однако более эффективно использовать частоту $f=350$ кГц, где генерируется S_0 мода волны Лэмба.

2) Продемонстрирована экспериментальная верификация метода приложения единичных или периодических циклов перегрузки/разгрузки для управления процессом роста усталостной трещины путем влияния на величину закрытия трещины (ΔK_{eff}) и пороговое значение КИН (ΔK_{th}). Обнаружено существенное влияние амплитуды и последовательности приложения циклов перегрузки-разгрузки на скорость роста трещины, однако косвенный метод анализа по РЭМ-фрактограммам не позволяет точно определять уровень влияния каждого параметра в отдельности (ΔK_{eff} , ΔK_{th}).

3) Разработан и протестирован комплекс для оценки параметров роста усталостной трещины в процессе циклического нагружения. Предложен и протестирован набор информативных параметров для оценки параметров механики разрушения, включающий отрисовку петли механического гистерезиса в координатах нагрузка-деформация/раскрытие (качественная оценка), максимальное значений деформации (ϵ_{max}), эффективную асимметрию цикла (R_{eff}). Результаты тестирования на примере роста трещины в алюминиевом сплаве при единичной перегрузке показали максимальный рост уровня закрытия ($R_{eff}=0,32$) на 30% от размера пластической зоны, сформированной циклом перегрузки, что согласуется с результатами аналитических расчетов.

4) Показано, что при решении практических задач использование разработанных аппаратно-программных комплексов, основанных на предложенных методах и расчете значений информативных параметров, позволяет проводить мониторинг состояния как стеклопластиковых, так и трехслойных углепластиковых композитов с выделением стадий усталостного разрушения, а также достоверно количественно характеризовать развитие процессов усталостного разрушения образцов титанового сплава со сварным соединением.

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. Р. 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. Р. 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. Р. 49–55.
4. Бурков М.В., Еремин А.В. и др. Применение ультразвуковой методики с использованием волн Лэмба для контроля состояния образцов алюминиевого сплава В96ц3Т // Дефектоскопия. 2017. Vol. 12. Р. 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. Р. 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. Burkov M.V., **Eremin A.V.** et al. Applying an Ultrasonic Lamb Wave Based Technique to Testing the Condition of V96ts3T12 Aluminum Alloy // *Russ. J. Nondestruct. Test.* **2017**. Vol. 53, № 12. P. 817–829.
10. **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.
11. 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.