

На правах рукописи



Бурков Михаил Владимирович

РАЗВИТИЕ ОПТИЧЕСКОГО МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ/КОНТРОЛЯ  
ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ,  
АРМИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ ВОЛОКНАМИ

Специальность 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ, материалов и изделий»

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск-2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН) и Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования Национальном исследовательском Томском политехническом университете (НИ ТПУ)

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Панин Сергей Викторович

Официальные оппоненты:

Белов Николай Николаевич - доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», профессор кафедры высшей математики.

Агапов Николай Афанасьевич, кандидат технических наук, Открытое Акционерное Общество «Опытно-демонстрационный центр вывода из эксплуатации уран-графитовых ядерных реакторов» (г. Северск, Томской обл.), начальник опытно-технологической лаборатории.

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А. Чаплыгина (г. Новосибирск)

Защита состоится «26» декабря 2013 г. в 15<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, Россия, г. Томск, ул. Савиных, д. 7, Институт неразрушающего контроля, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Белинского, 53.

Автореферат разослан «    » ноября 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.269.09  
кандидат технических наук, доцент



Е.А. Васендина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Композиционные материалы (КМ), армированные высокопрочными волокнами, обладая уникальным комплексом физико-механических характеристик, все шире применяются в различных отраслях промышленности, особенно в аэрокосмической. Композиты, помимо высоких прочностных свойств, предоставляют конструктору возможность изменять количество армирующего волокна при проектировании детали для создания материалов со свойствами, наиболее точно подходящими для конкретных условий её эксплуатации. Такой подход в сочетании с низкой плотностью и высокими прочностными характеристиками волокон позволяет обеспечивать значительно бóльшие характеристики удельной прочности КМ по сравнению с некомпозиционными материалами.

Однако, в отличие от однородных материалов, композиты обладают сложной гетерогенной структурой, наличием нескольких направлений армирования, разными свойствами матрицы и волокна, большим количеством границ раздела волокна и связующего. Наличие столь сложной структуры, с одной стороны, позволяет достигать высоких эксплуатационных свойств, с другой стороны, обуславливает необходимость контроля ее состояния из-за наличия повреждений и дефектов как производственного, так и эксплуатационного происхождения.

Поскольку традиционные способы выявления дефектов (например, ультразвуковой) не всегда оказываются достаточно производительными и чувствительными, а, кроме этого, требуют обеспечения всестороннего доступа ко всем частям изделий, актуальной задачей является разработка методов и средств контроля изделий из КМ. Другой важной задачей является создание устройств встроенного контроля состояния, что в западной научно-технической литературе получило название Structural Health Monitoring (SHM). Подобные системы позволяют в режиме реального времени получать информацию о наличии/возникновении повреждений, существенно повышая безопасность эксплуатации, а также обеспечивая возможность увеличения временных интервалов между точками планового полномасштабного контроля (диагностики).

Значительный интерес представляют оптические методы контроля, благодаря бесконтактному получению первичной информации и возможности проводить измерения *in situ* в процессе нагружения. Так, например, с помощью метода корреляции цифровых изображений, наблюдая за изменениями поверхности, рассчитываются поля векторов перемещений. Далее получают компоненты деформации и рассчитывают не только количественную информацию (величину интенсивности деформации в расчетной области), но и качественную (распределения деформации в этой области).

Расширить возможности контроля можно путем совместной регистрации данных методов на основе разных физических принципов. Так, в коллективе под руководством профессора Степановой Л.Н. (СибНИА им. С.А. Чаплыгина) для экспериментальных исследований деформации и разрушения элементов конструкций совместно применяют методы акустической эмиссии (АЭ) и тензометрии. В ИМСС УрО РАН в группе профессора Наймарка О.Б. используется комбинирование АЭ и термометрии. В ИМАШ УрО РАН в группе под руководством академика Э.С. Горкунова применяются магнитные методы и тензометрия и т. д.

Таким образом, актуальной научно-технической проблемой является разработка комплексного (комбинированного) подхода к неразрушающему контролю (НК)/оценке механического состояния КМ, армированных высокопрочными волокнами (УКМ), и создание на основе этого подхода систем для мониторинга механического состояния деталей машин и элементов конструкций.

**Целью настоящей работы** является развитие оптического метода исследования/контроля деформации и разрушения деталей и элементов конструкций из композитов на основе углеродных волокон, а также разработка и тестирование лабораторных стендов для их применения в условиях приложения статических и циклических нагрузок.

Для достижения поставленной цели, необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать лабораторный стенд, принцип действия которого основан на комбинированном применении оптического (корреляция цифровых изображений - DIC) и акустического (АЭ) методов контроля деформации и разрушения, для получения оценки регистрируемых процессов как на поверхности, так и в объеме исследуемого материала. Провести тестирование данного стенда при статических испытаниях образцов УКМ при различных схемах нагружения, положив в основу анализа информационных параметров характерные стадии их изменения.

2. Разработать лабораторный стенд для контроля усталостного разрушения УКМ при испытаниях на циклическое растяжение, принцип действия которого основан на применении датчика деформации интегрального типа (ДДИТ). Провести тестирование стенда при испытании образцов УКМ с концентраторами напряжений различной конфигурации.

3. Разработать лабораторный стенд для контроля структурной целостности и оценки степени дефектности деталей и элементов конструкций из УКМ, принцип действия которого основан на методе цифровой сдвиговой спекл-интерферометрии (ширографии). Провести тестирование стенда при испытаниях модельных и экспериментальных образцов при различных схемах приложения нагрузки (измерении плоскостных и внеплоскостных деформаций).

4. Разработать технологические рекомендации по проведению контроля деталей и изделий из УКМ в условиях приложения циклических нагрузок с помощью датчика деформации интегрального типа.

**Научную новизну** работы определяют:

1. Результаты тестирования лабораторного стенда для статических испытаний образцов УКМ, выявившие согласованный трехстадийный характер изменения всех информационных параметров: активности АЭ, интенсивности деформации сдвига и производной деформирующего напряжения по удлинению.

2. Результаты тестирования разработанной методики контроля усталостного разрушения УКМ, основанной на оценке состояния тонкого алюминиевого датчика (фольги) с помощью комплекса информативных признаков, показавшие высокую чувствительность датчика к циклической деформации УКМ. Применение предложенного комплекса информативных признаков для анализа серий изображений ДДИТ позволяет достоверно контролировать изменения рельефа тонкопленочного датчика.

3. Предложенный информативный параметр для количественной оценки цифровых широграмм, позволивший подобно общепринятой фазосдвиговой методике измерения деформации, получать количественную оценку механического состояния нагруженных УКМ.

**Практическую ценность работы** составляют:

1. Разработанный лабораторный стенд для комбинированного исследования/контроля деформации и разрушения УКМ по данным методов АЭ и DIC при статическом нагружении.

2. Предложенная методика контроля усталостного разрушения УКМ, основанная на оценке рельефа поверхности тонкопленочного алюминиевого датчика состояния (фольги), получаемой с помощью расчета совокупности информативных признаков. Для различных условий циклических испытаний показано количественное различие изменения информативных параметров, рассчитываемых по оптическим изображениям тонкопленочного элемента, что позволяет проводить оценку циклической деформации образцов УКМ.

3. Разработанный лабораторный стенд для контроля состояния УКМ методом цифровой широкографии на базе зеркального цифрового фотоаппарата. Предложен информативный параметр, позволяющий путем количественного анализа цифровых широграмм получать интегральную оценку деформации нагруженных материалов.

**Методы исследования.** В качестве основных методов исследования в работе использованы экспериментальные методы статических и циклических испытаний композиционных материалов, методы цифровой обработки и анализа изображений и сигналов, математической статистики, моделирования методом конечных элементов.

**Внедрение работы.** Результаты работы используются в ИФПМ СО РАН и НИ ТПУ для проведения экспериментальных исследований различных материалов в рамках различных бюджетных и внебюджетных проектов. Автор принимал участие в работах по договору «Разработка оптического метода встроенного контроля высоконагруженных агрегатов планера» (№ БТ-ОНМК-01-08 от 23 июня 2008 г.) между ОАО «ОКБ Сухого» и ИФПМ СО РАН. Полученные результаты подтверждаются соответствующим актом внедрения.

**Связь работы с научными программами и темами.** Диссертационная работа выполнена в ИФПМ СО РАН и НИ ТПУ в соответствии с планами государственных и отраслевых научных программ: Проект г/б исследований СО РАН Ш.20.1. «Разработка методологии и критериев диагностики состояния нагруженных материалов на основе многоуровневого подхода» (2010-2012 гг.); Грант «Научные основы формирования заданных функциональных свойств наноструктурированных систем и разработка методов наноструктурирования рабочих поверхностей конструкционных материалов для повышения их усталостной прочности и долговечности» (2012–2013 гг.); Грант (стипендия Президента РФ) СП-3788.2013.3 «Акустико-оптический метод неразрушающего контроля состояния образцов и изделий из углеродных композиционных материалов» (2013–2015 гг.); Проект г/б исследований СО РАН № Ш.23.1.3. «Научные основы диагностики предразрушения и оценки ресурса работы многоуровневых структурно-неоднородных сред» (2013-2016 гг.).

**Апробация работы.** Результаты работы были представлены на следующих конференциях и семинарах: V Российская научно-техническая конференция «Ресурс

и диагностика материалов и конструкций», 25-29 апреля 2011 г., Екатеринбург; I Всероссийская с международным участием научно-практическая конференция по инновациям в неразрушающем контроле SibTest, 25-29 июля 2011 г., Горный Алтай; XIX Всероссийская научно-техническая конференция по НК и ТД», 6-8 сентября 2011 г, Самара; 18<sup>th</sup> World conference on non-destructive testing, 16-20 April 2012, Durban, RSA; II Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность», 28 мая – 1 июня 2012 г., Томск; 19<sup>th</sup> European Conference on Fracture, 26-31 August, 2012, Kazan, Russia,; Школа-семинар «Проблемы прочности авиационных конструкций и материалов», 27 февраля – 2 марта, 2013 г., Новосибирск; 7<sup>th</sup> International conference on airworthiness and fatigue, 25-27 March, 2013, Beijing, China; II Всероссийская с международным участием научно-практическая конференция по инновациям в неразрушающем контроле SibTest, 12-17 августа 2013 г., п. Листвянка.

**Достоверность** полученных в работе экспериментальных данных, выводов и рекомендаций обеспечена воспроизводимостью результатов, систематическим характером экспериментальных исследований, соответствием экспериментальных исследований и компьютерных расчетов, а также согласием результатов исследований с литературными данными и результатами других авторов.

**Личный вклад.** Автором, на основе испытательно-диагностического комплекса для исследования деформации и разрушения металлических материалов по данным акустической эмиссии и корреляции цифровых изображений, разработан лабораторный стенд для комбинированного исследования деформации КМ на основе углеродных волокон. Совместно с научным руководителем выполнена постановка задач диссертационного исследования, проведен анализ результатов теоретических и практических исследований, а также их обсуждение. Проведены экспериментальные исследования стадийности изменения информационных параметров при статическом нагружении образцов УКМ при различных схемах нагружения. Разработана методика и лабораторный стенд для диагностики усталостного разрушения КМ по данным изменения рельефа поверхности чувствительного элемента (фольги). Проведены экспериментальные исследования изменения информативных признаков при циклическом нагружении образцов УКМ. Спроектирован и изготовлен лабораторный стенд для исследования/контроля деформации КМ с помощью метода сдвиговой спекл-интерферометрии.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Комбинированная методика исследования/контроля деформации и разрушения УКМ при статическом нагружении, основанная на выделении характерных стадий изменения информационных параметров оптического и акустического методов, позволяет достоверно выявлять наступление характерных стадий их деформирования.

2. Методика диагностики усталостного разрушения УКМ, основанная на количественной характеристике оптических изображений деформационного рельефа на поверхности чувствительного тонкопленочного элемента (фольги), позволяет по совокупности данных расчета информативных признаков оценивать механическое состояние на различных стадиях циклического нагружения, начиная с наработки не менее 1 % от полного количества циклов до разрушения.

3. Информативный признак, применяемый для количественной оценки цифровых широгрaмм, позволяет, наряду с общепринятой в широгрaфии методикой измерения деформации, получать количественную оценку механического состояния УКМ при различных схемах приложения нагрузки.

4. Варианты реализации лабораторных стендов для исследования/ контроля деформации и разрушения УКМ при статическом и циклическом нагружении позволяют на основе оптического, либо оптико-акустического методов, оценивать механическое состояние КМ на основе углеродных волокон по данным выделения характерных стадий изменения информационных параметров.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 36 работ, из них 5 статей в журналах, входящих в Перечень рецензируемых изданий, 2 статьи в других изданиях, 29 публикаций в сборниках трудов и тезисов Всероссийских и международных конференций.

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Всего 169 страниц, в том числе 85 рисунков, 8 таблиц, 4 приложения. Список литературы содержит 104 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность работы, формулируются цель и задачи исследования, приводится краткое содержание работы по главам.

**В первой главе** диссертации проведен аналитический обзор методов неразрушающего контроля, экспериментальных *in situ* методов исследования процессов деформаций и разрушения композиционных материалов, а также вопросов комбинированного применения одновременно нескольких методов. Рассмотрены работы по использованию АЭ и метода корреляции цифровых изображений для раннего обнаружения развивающихся дефектов. Приведен обзор данных по проведению исследований с использованием метода цифровой сдвиговой спекл-интерферометрии. Проанализирована методика оценки усталостной поврежденности с помощью тонкопленочных датчиков, которая может быть основой для создания устройств встроенного контроля (SHM).

**Во второй главе** описаны композиционные материалы, на которых проводили тестирование разработанных стендов оценки деформации. Для статических испытаний использовали КМ системы углеродное волокно/пироуглеродная матрица (УУКМ) с псевдоизотропной укладкой -  $[0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 90^\circ]_{8S}$ . УУКМ обладает высокой прочностью, а также способностью работать при высоких температурах (до  $500^\circ\text{C}$  на воздухе, до  $2000^\circ\text{C}$  в инертной среде или с защитным покрытием).

Для циклических испытаний применяли УКМ системы углеродное волокно/эпоксидная матрица (УЭКМ). Материал представляет собой псевдоизотропный композит из слоев однонаправленных углеродных лент с укладкой  $[45^\circ, -45^\circ, 0^\circ, 90^\circ]_{2S}$  и эпоксидной матрицей. Для защиты поверхности материала в укладку в качестве внешних слоев добавлены слои стеклоткани.

Рассмотрены алгоритмы цифровой обработки данных акустической эмиссии и корреляции цифровых изображений: приведены блок-схемы программного обеспечения для анализа оптических изображений и акустических сигналов. Для каждого из методов выбраны информационные параметры.

Так, для анализа данным метода DIC используется интенсивность деформации сдвига:

$$\gamma_i = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + \varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 + \frac{3}{2} \varepsilon_{xy}^2}$$

А для акустической эмиссии основным информационным параметром являлась активность АЭ:

$$N_{\Sigma}' = \frac{\Delta N_{\Sigma}}{\Delta t}$$

**Третья глава** посвящена описанию лабораторного стенда на основе комбинирования методов DIC и АЭ для исследования процессов деформации и разрушения КМ. Приводятся результаты экспериментальных исследований, связанных с тестированием комбинированного оптико-акустического метода при статических испытаниях УУКМ при различных схемах нагружения с различными концентраторами напряжений. Представлены чертежи образцов и схемы их нагружения, рассмотрены методики получения первичных данных акустических и оптических методов. Полученные результаты АЭ и DIC рассмотрены с помощью стадийного подхода для анализа деформации и разрушения. Показаны результаты моделирования деформационного поведения УУКМ рассчитанные методом конечных элементов (МКЭ).

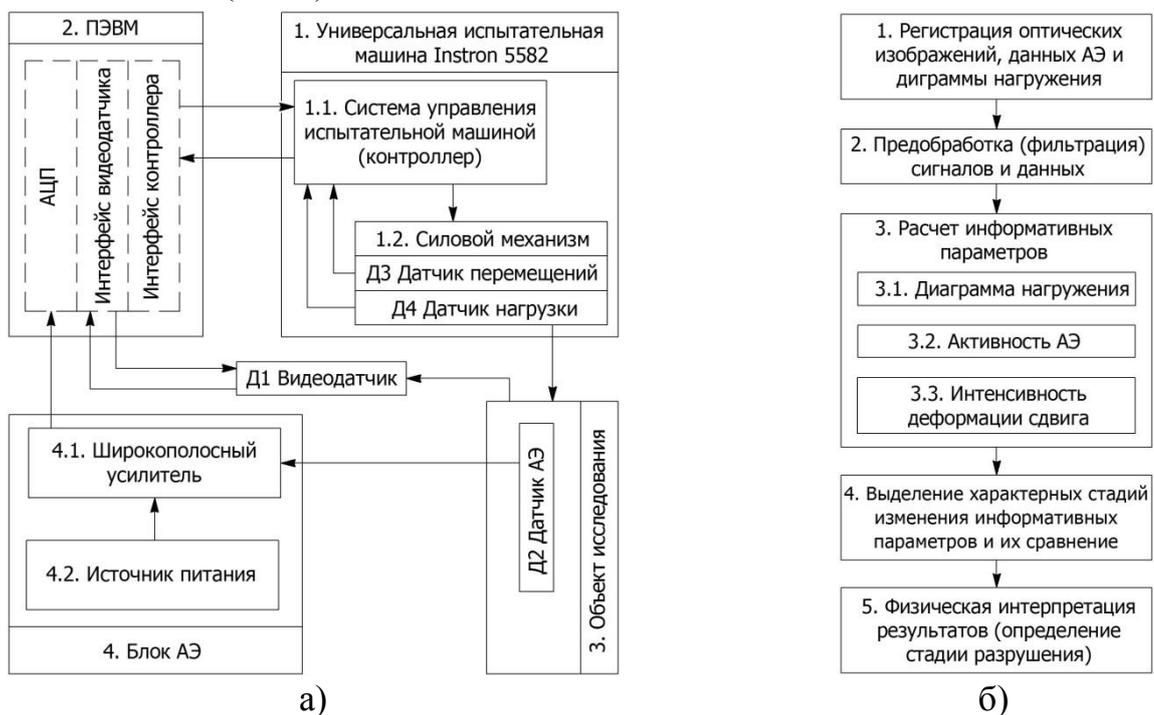


Рис. 1. Схема лабораторного стенда для статических испытаний на базе Instron-5582 (а) и блок-схема его работы (б)

В работе разрабатывали методику и лабораторный стенд (Рис. 1) для оценки деформации УУКМ при статических испытаниях на основе комбинированного применения следующих методов:

- метод DIC, основанный на дифференцировании поля движения, определяемого по оптическим изображениям;
- метод регистрации АЭ;

- тензометрический метод, с помощью которого записывается диаграмма нагружения (источником данных являются датчики перемещения и нагрузки в составе испытательной машины).

Стенд состоит из следующих частей (Рис. 1,а): универсальная испытательная машина (1); ПЭВМ (2); объект исследования (3); блок регистрации АЭ (4). Также в состав стенда входят следующие датчики: фотокамера Canon EOS 550D, оснащенная длиннофокусным объективом Canon EF-S 100-400mm 1/4-5.6 IS (Д1), преобразователь акустической эмиссии GT-301 (Д2) и два датчика в составе испытательной машины: датчик перемещений (Д3) и датчик нагрузки (Д4).

Общая схема работы стенда приведена на Рис. 1,б. Этап регистрации данных (1) включает управление испытательной машиной, видеодатчиком, сбором данных АЭ, оптических изображений и преобразованием их в цифровой вид. Для регистрации сигналов АЭ устанавливается величина порога дискриминации, для фиксирования изображений поверхности образца - периодичность фотографирования.

На этапе предобработки (2) производится фильтрация шумов, помех и т. п. По полученным данным проводится расчет информационных параметров (3). По данным нагрузки и перемещения строится диаграмма  $\sigma - \epsilon$  (3.1). По данным АЭ рассчитывается зависимость активности АЭ (3.2) от удлинения. Корреляционный анализ оптических изображений (3.3) позволяет получить зависимость интенсивности деформации сдвига (ИДС) от величины удлинения. На двух последних этапах (4) и (5) производится выделение характерных стадий изменения информационных параметров и интерпретация результатов.

Для тестирования работы лабораторного стенда при приложении статических нагрузок использовали различные схемы нагружения. Их выбирали из стандартов ASTM для прочностных испытаний КМ. Исходные размеры концентраторов напряжений (КН), предлагаемые в стандартах, варьировали, получая три размера КН на каждый тип образца. Таким образом добивались изменения напряженно-деформированного состояния образцов (НДС) при нагружении, для оценки изменения данного состояния с помощью используемой методики обработки и анализа данных.

Использование метода DIC подразумевает формирование на поверхности всех образцов с помощью аэрозольной краски спекл-рисунок (на серый фон наносили точки черного цвета). Для расчета величины средней ИДС  $\gamma$  выбирали область изображения, расположенную в центре образца, вокруг КН. Например, для образца с отверстием размер области составлял  $3300 \times 4950$  пикселей (физические размеры  $\sim 35 \times 52,5$  мм). Расчет ИДС проводили дифференциальным способом, когда текущее изображение сравнивали с последующим. Для исключения части, соответствующей КН, накладывали маску, убирая данный участок из расчета.

Помимо развития комбинированного метода контроля, в работе решали задачу установления взаимосвязи между деформационными процессами, развивающимися на различных масштабных уровнях. Данные диаграмм нагружения, АЭ и DIC позволяют одновременно регистрировать проявление активности деформации на следующих масштабах:

- диаграмма нагружения  $\sigma - \epsilon$  отражает макроуровень, т. е. отклик образца в целом на приложение нагрузки;
- DIC характеризует уровень, сопоставимый по масштабу с макроуровнем, т.к. в поле обзора попадает практически вся ширина образца;

- АЭ характеризует уровень нарушения сплошности, прежде всего, по границе волокон и связующего. АЭ регистрирует процессы в объеме всего материала, в то время как данные оптического метода основаны на изменениях в верхнем наблюдаемом слое композита.

Удобным и наглядным подходом к выявлению активизации деформационных процессов является выделение характерных стадий развития деформации и разрушения, которые связаны с соответствующими механизмами и деформационными (дефектными) структурами. Идеология выделения стадий процессов деформации и разрушения, использованная в предыдущих исследованиях нашего коллектива (где испытывали алюминиевые образцы с различными видами КН) сохранена и в настоящей работе.

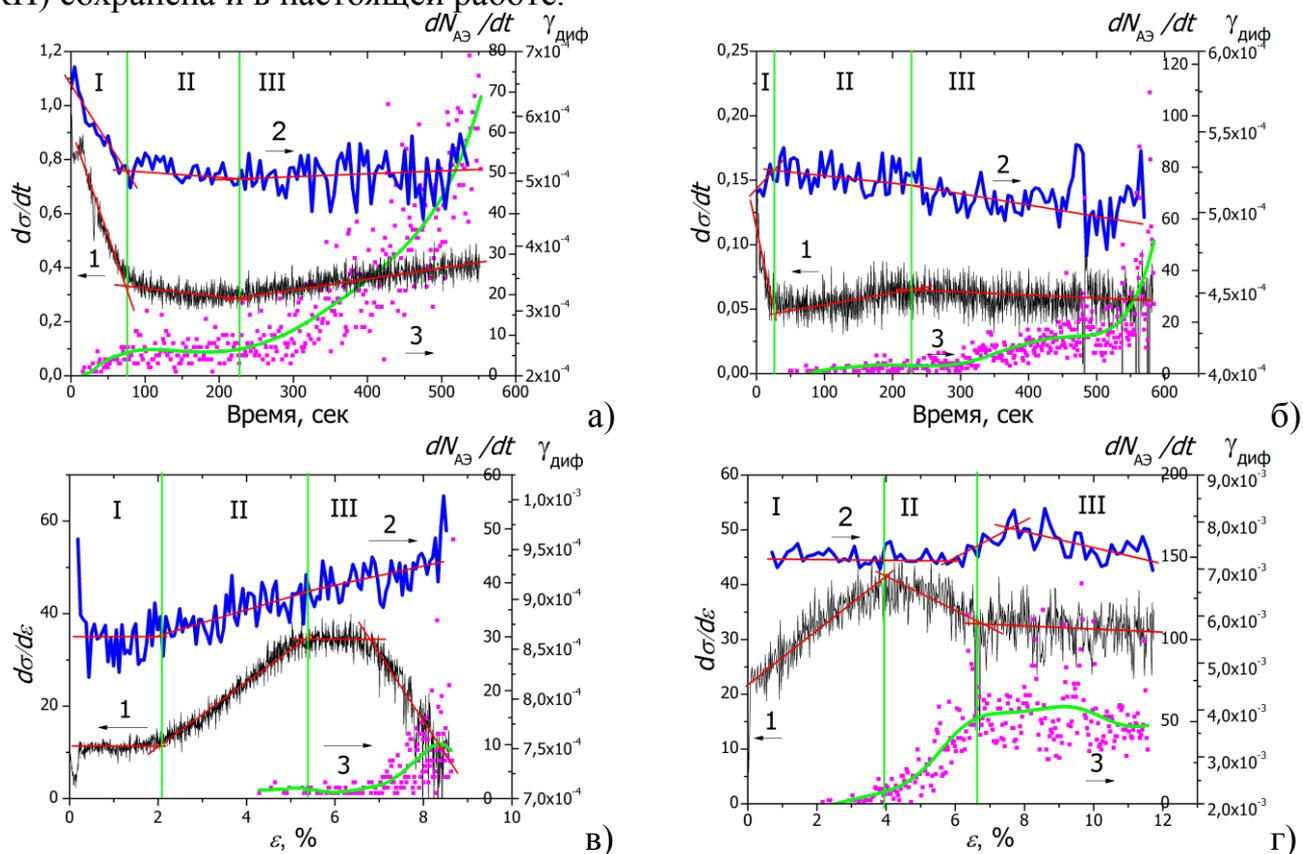


Рис. 2. Производная  $d\sigma/dt$  (1), ИДС (2) и активность АЭ (3): а) растяжение с отверстием; б) растяжение с надпилем; в) сдвиг; г) трехточечный изгиб.

По данным АЭ, ИДС и производных диаграмм нагружения при испытании образцов с различными КН были выделены три характерные стадии развития деформации (Рис. 2). Стадийный подход при исследовании и контроле деформации и разрушения в случае невысокой степени концентрации напряжений (растяжение образцов с отверстием и испытания на трехточечный изгиб) является достаточно информативным и взаимодополняющим. Однако соответствие длительности стадий, выявленных по данным регистрации информационных параметров различными методами, значительно зависит от характера НДС нагружаемого образца (т.е. схемы испытаний - растяжение, сдвиг, изгиб и т.п.). Так, например, для растяжения образца с отверстием (Рис. 2,а) получено наилучшее соответствие данных всех трех методов анализа. Данная схема нагружения не является сложной – нет вращения образца, наибольшая деформация локализована в области вокруг отверстия. Данные диаграмм

нагрузки позволяют связать интегральное поведение образца с конкретными деформационными процессами, происходящими в материале. При испытаниях на сдвиг (Рис. 2,в) такое соответствие наблюдалось в значительно меньшей степени. Полученный результат при испытаниях на сдвиг связан с особенностями данной схемы нагружения: значительно меньший объем деформируемого материала (и меньшая наблюдаемая площадь, что требует большей чувствительности/разрешения регистрирующей аппаратуры) и сложное НДС из-за несовершенства системы нагружения – помимо сдвига в рабочем сечении присутствует изгибающий момент от наличия плеча между точкой опоры и точкой приложения нагрузки.

Для анализа деформации образцов исследуемого УУКМ и для подтверждения данных, получаемых оптическим методом оценки деформации, было проведено моделирование их деформирования с помощью метода конечных элементов. На Рис. 3 представлены распределения деформаций, рассчитанные МКЭ и распределения НДС по методу DIC.

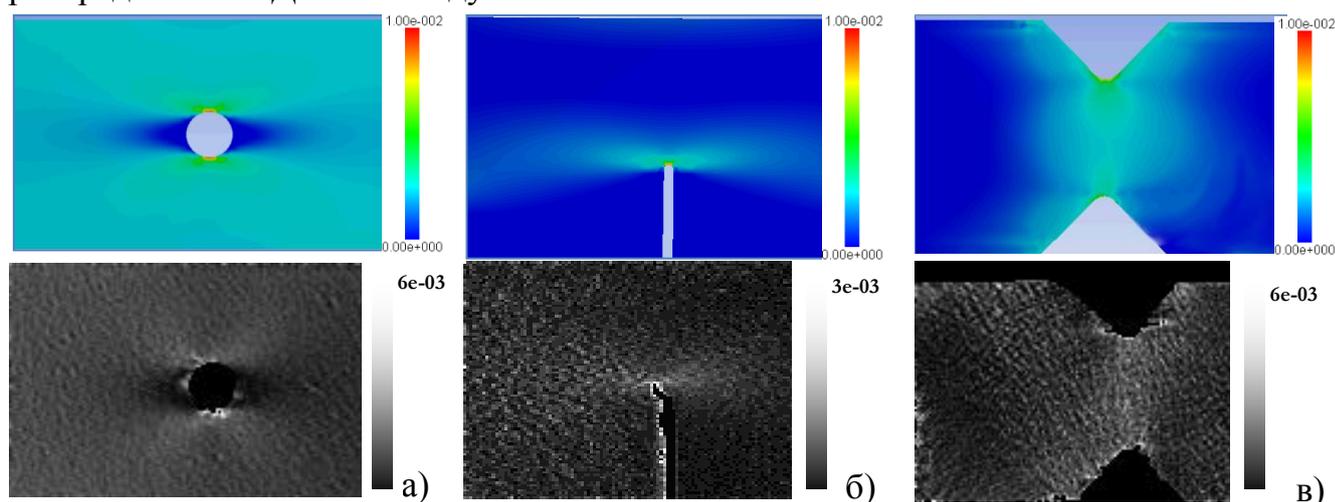


Рис. 3. Распределения деформаций, рассчитанные МКЭ и НДС по методу DIC. а) растяжение с отверстием; б) растяжение с надпилем; в) испытание на сдвиг.

Результаты расчета DIC хорошо соответствуют результату моделирования: из-за упругого поведения УУКМ максимальные деформации находятся в минимальном сечении около КН, при этом их величина существенно выше, чем их значения в областях, расположенных вдали от концентратора напряжений.

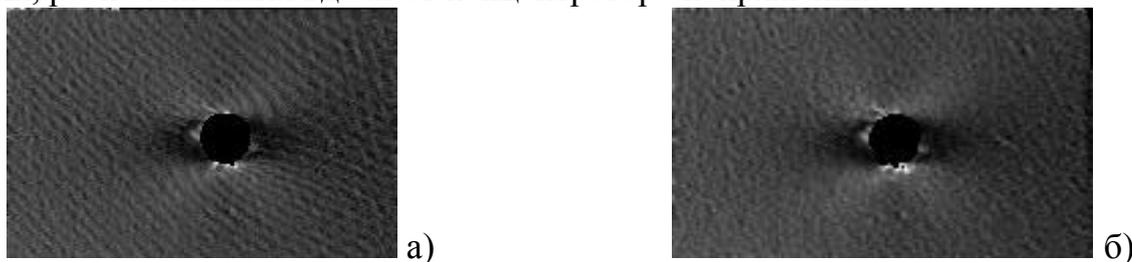


Рис. 4. Распределения НДС с влиянием эффекта peak-locking (а) и без него (б).

При расчете распределений НДС был обнаружен негативный эффект peak-locking (Рис. 4), при котором рассчитанные с субпиксельной точностью значения НДС группируются около целочисленных значений, что в итоге выливается в появление параллельных полос с определенным периодом на распределениях НДС. Использование для обработки оптических данных комбинированной методики с

использованием алгоритма Lucas-Kanade позволило значительно снизить влияние данного эффекта.

Анализируя вышесказанное с точки зрения одновременного использования данных, получаемых всеми тремя методами, можно заключить, что:

- метод DIC требует использования большего разрешения оптической системы, но позволяет визуализировать деформационные процессы в наблюдаемом слое с получением численной оценки локальной деформации;
- АЭ дополняет оптический метод, благодаря высокой чувствительности и способности характеризовать процессы, происходящие в объеме материала;
- данные диаграмм нагружения обладают меньшей, чем АЭ, чувствительностью, но интегрально характеризуют макроотклик образца и позволяет определить переход от одной стадии деформирования к последующей.

**В четвертой главе** рассмотрена структура лабораторного стенда для циклических испытаний и методики расчета информативных признаков. Показаны результаты усталостных испытаний УЭКМ с наклеенными тонкими алюминиевыми фольгами – датчиками деформации интегрального типа (ДДИТ). Приведены чертежи образцов и схемы их нагружения, рассмотрены методики получения первичных данных оптического метода. Рассмотрены алгоритмы цифровой обработки данных и информативные признаки для оценки деформационного рельефа, формирующегося в процессе циклического нагружения.



Рис. 5. Схема испытательного стенда для циклических исследований.

В состав лабораторного стенда (Рис. 5) входят следующие блоки: персональный компьютер для фиксации, обработки и визуализации данных, а также управления периферийными устройствами; испытательная машина UTM Biss-00-201 и контроллер; фотокамера EOS 550D с оптическим трактом микроскопа МБС-9; осветители: галогеновый и точечный светодиодный (LED).

Испытания проводили по схеме одноосного циклического растяжения с асимметрией цикла  $R = 0,1$  и частотой нагружения 10 Гц. Устанавливается периодичность фотографирования поверхности образца: при достижении заданного количества циклов наработки циклическое нагружение останавливается и происходит фотографирование в точках верхней и нижней нагрузок в цикле, после чего испытание возобновляется.

Подготовка ДДИТ заключается в полировке для получения зеркальной поверхности фольги с минимальным количеством дефектов. Благодаря одинаковому качеству поверхности фольг, существенно повышается повторяемость как абсолютных, так и относительных значений информативных признаков.

Галогеновый осветитель располагали под углом  $45^\circ$  к поверхности образца для формирования общего фона изображения. Точечный LED был расположен под углом  $10^\circ$  для увеличения контраста формирующихся на поверхности деформационных складок. Такая схема освещения полированной фольги позволяет получить на начальных этапах циклического нагружения темное изображение, так как отраженный свет не попадает в объектив микроскопа. Далее по мере наработки образуется деформационный рельеф, на котором происходит рассеянное отражение, поэтому области со сформировавшимся рельефом являются более светлыми (см. Рис. 6).

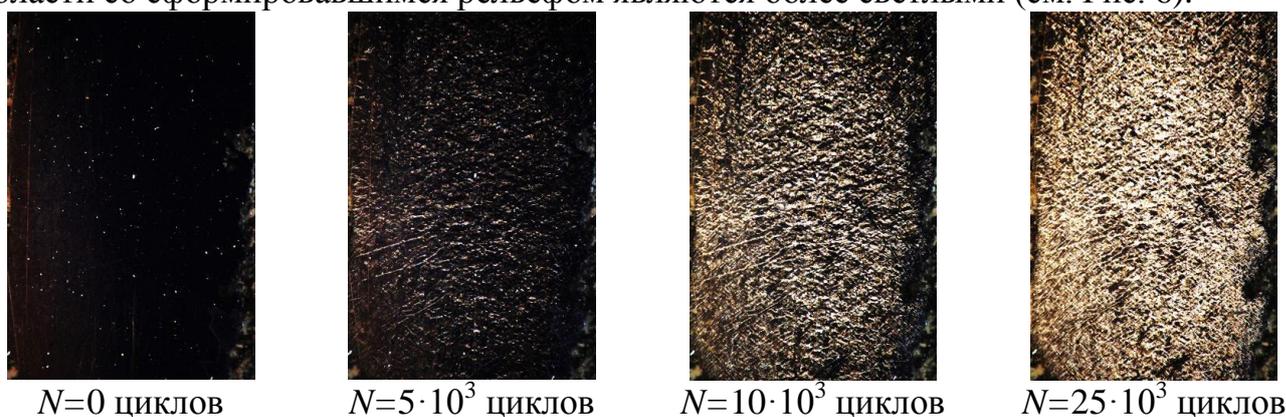


Рис. 6. Фотографии фольги-датчика в зависимости от наработки.

Для тестирования лабораторного стенда были проведены серии испытаний образцов УЭКМ с наклеенными ДДИТ, разделенные на 2 группы: с двумя боковыми надпилами, на которых изучается влияние разной наработки на реакцию ДДИТ, и образцы с одним надпилем различных размеров (изучается влияние изменения НДС на реакцию ДДИТ). Кроме того, расчет информативных признаков проводили по двум областям фольги (центральная - около КН и верхняя - вдали от КН).

Для образцов с двумя надпилам устанавливалась разная верхняя нагрузка цикла для получения в результате усталостного разрушения на разных наработках. Таким образом, были получены серии изображений фольг-датчиков для образцов со следующими значениями наработки до разрушения:  $42 \cdot 10^3$  циклов (№1),  $74 \cdot 10^3$  циклов (№2) и  $151 \cdot 10^3$  циклов (№3). На Рис. 7 представлен график  $MSE$  (среднеквадратичной ошибки) и  $H$  (информационной энтропии) для трех образцов с различной наработкой до разрушения. Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод, что для каждого из образцов в центральной расчетной области  $MSE$  и  $H$  имеют место более высокие скорости роста и более высокие абсолютные значения, чем в верхней, где локализация деформации меньше. Оба информативных признака обладают трехстадийным характером: 1-я стадия характеризуется небольшим ростом значения, 2-ой линейный участок быстрого роста и 3-я стадия с постепенно падающим наклоном кривой. При этом с ростом нагрузки (и соответственно снижением наработки) увеличиваются абсолютные значения параметров  $MSE$  и  $H$ , а наклон их графиков становится более крутым, что свидетельствует о большей скорости накопления деформационного рельефа и его большей неоднородности.

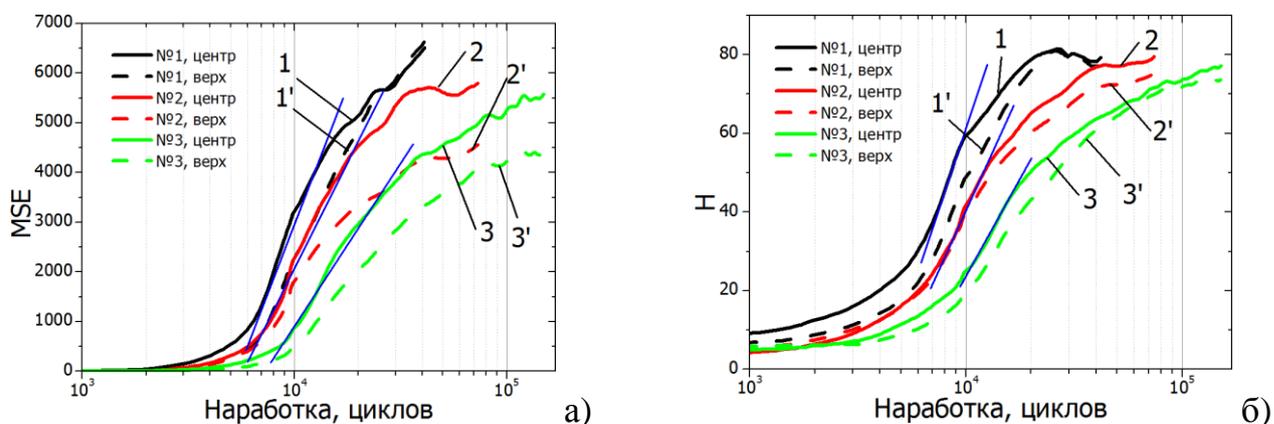


Рис. 7. Графики  $MSE$  (а) и  $H$  (б): указан номер образца; номеру со штрихом соответствует верхняя расчетная область фольги, без штриха центральной.

Кроме того, для всех серий изображений были рассчитаны значения энергии Фурье-спектра и фрактальной размерности. При совместном использовании всех информативных признаков можно достаточно достоверно диагностировать наступление стадии усталостного предразрушения.

Для образцов с различными размерами надпила устанавливалась разная верхняя нагрузка цикла с целью достижения усталостного разрушения при одинаковой величине наработки. Таким образом, получены серии изображений фольг-датчиков для образцов с наработкой до разрушения:  $50 \cdot 10^3$  циклов (образец №1),  $27 \cdot 10^3$  циклов (образец №2) и  $48 \cdot 10^3$  циклов (образец №3). На Рис. 8 представлен график  $MSE$  и  $H$  для трех образцов с различным размером надпила.

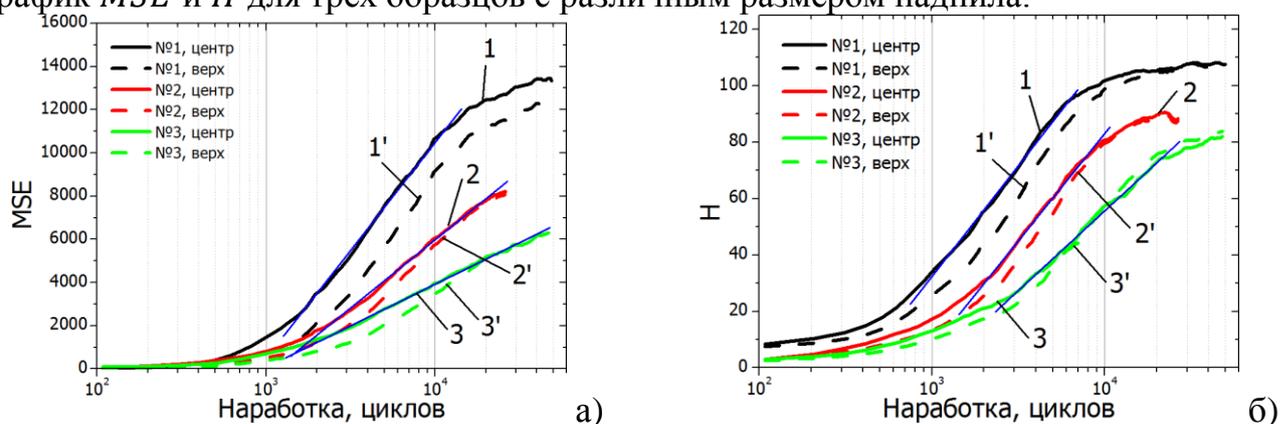


Рис. 8. Графики  $MSE$  (а) и  $H$  (б): указан номер образца; номеру со штрихом соответствует верхняя расчетная область фольги, без штриха центральной.

Видно, что абсолютное значение информативных признаков перед разрушением тем выше, чем меньше размер надпила. Такой характер изменения информативного признака, наиболее вероятно, связан с тем, что с увеличением размера надпила увеличивается коэффициент концентрации напряжений в вершине надпила; при этом вдали от надпила уровень деформаций снижается. Таким образом, из-за разной неоднородности рельефа в областях около вершины надпила и вдали от него значение информативного признака будет усредняться. Данное заключение подтверждается одинаковым характером изменения всех информативных признаков с увеличением размера надпила. Аналогично предыдущему типу образцов, кривые имеют трехстадийный характер, однако для некоторых из них 3-я стадия является

невыраженной или отсутствует вовсе. Анализ вышесказанного позволяет заключить, что ДДИТ демонстрирует высокую чувствительность к деформации нагруженного материала. С помощью комплекса информативных признаков, предложенных для анализа серий изображений ДДИТ, можно достоверно контролировать изменения рельефа фольги-датчика по мере циклической наработки и оценивать состояние материала вплоть до 150 тыс. циклов наработки (на более длительную наработку испытания не проводили). Практическое использование данной методики связано с построением номограмм для конкретных условий и схем нагружения, вида и направления приложенной нагрузки и типа материала, что в дальнейшем позволит оценивать остаточный ресурс конструкций.

**В пятой главе** описаны результаты, связанные с разработкой и тестированием лабораторного стенда для контроля структурной целостности конструкционных материалов методом сдвиговой спекл-интерферометрии. Обсуждается конструкция лабораторного стенда, принцип его работы, а также результаты его тестирования на модельных и экспериментальных образцах.

Образцы для исследования функционирования (тестирования) стенда, чувствительного к внеплоскостной деформации (направленной по нормали к поверхности), представляли собой тонкую круглую мембрану, нагружаемую точечной нагрузкой перпендикулярно поверхности. Нагрузка прикладывается в центре мембраны с помощью винта микрометра, по показаниям которого контролируется величина внеплоскостной деформации мембраны. В качестве мембран использовали образцы алюминиевого сплава Д16Т и волокнистого КМ.

Путем вычитания полученных серий спекл-изображений получали цифровые широгаммы. При этом сравнивали первое изображение (недеформированное состояние образца) и последующее (после приращения деформации). Далее конвертировали широгаммы в градации серого (от 0 до 255). Для количественного анализа широгамм был использован расчет плотности перепадов яркости (ППЯ). Расчет данного информативного признака заключается в следующем:

- проводится расчет среднего значения между точками максимальной и минимальной яркости на широгамме;
- выполняется построчный расчет путем прибавления значений счетчика при скачке значения яркости между соседними пикселями, пересекать рассчитанное среднее значение;
- аналогично проводится постолбцовый расчет значения данного информативного признака.

Для расчета ППЯ необходимо избавиться от «мелкозернистого» шума лазерного спекла предварительной фильтрацией широгамм методом билатеральной фильтрации. Для исключения из расчета областей вокруг мембраны накладывали круглую маску.

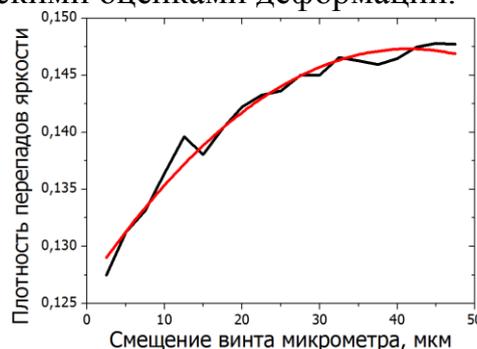
На Рис. 9 представлены зависимости плотности перепадов яркости от величины смещения винта микрометра. Видно, что оба графика практически идентичны, что свидетельствует о том, что характер деформации мембраны не зависит от типа исследованного материала (алюминиевый сплав или КМ). Характер деформации обусловлен, прежде всего, геометрией схемы нагружения: круглая пластина, зажатая по контуру, изгибается нагрузкой, прикладываемой в центре пластины.

Видно, что изменение информативного признака происходит нелинейно, особенно, при больших деформациях. По мнению авторов, нелинейность графика

связана с увеличивающейся декорреляцией широгаммы по мере увеличения деформации. В то же время подобие формы графиков свидетельствует о корректности работы стенда при испытании материалов с различными механическими характеристиками. Аналогично были проведены эксперименты по оценке плоскостной деформации на образцах, испытываемых на растяжение, получено хорошее согласие данных с аналитическими оценками деформации.



образец из алюминиевого сплава Д16АТ



образец из УУКМ

Рис. 9. Графики ППЯ, значения аппроксимированы квадратичной функцией

Таким образом, предложенный информативный признак для количественной оценки цифровых широгамм позволяет, наряду с общепринятым методом измерения деформации, получать количественную оценку механического состояния УКМ при различных схемах приложения нагрузки.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В рамках развития оптического метода НК разработаны лабораторные стенды для исследования/контроля деформации и разрушения УКМ при приложении статических и циклических нагрузок. Их тестирование было проведено путем систематических исследований образцов УКМ с различными КН и схемами приложения нагрузки. Получены следующие основные научные и практические результаты:

1) В результате тестирования лабораторного стенда для статических испытаний образцов УКМ при различных схемах нагружения установлено соответствие стадийного изменения информационных параметров, регистрируемых с помощью трех методов: АЭ, DIC и тензометрии. Показано, что изменение всех анализируемых информационных параметров (активности АЭ, ИДС и производной напряжений по времени) имеет трехстадийный характер, что связано со спецификой разрушения исследованных материалов, имеющих многоуровневую структуру.

2) При одновременном анализе данных, получаемых тремя использованными методами, показано, что: а) метод DIC позволяет визуализировать деформационные процессы, развивающиеся во внешнем слое, с получением численной оценки локальной деформации; б) метод АЭ, благодаря высокой чувствительности и способности характеризовать процессы, происходящие в объеме материала, позволяет максимально информативно идентифицировать процессы разрушения, взаимодополняя данные оптических наблюдений и измерений; в) данные диаграмм нагружения обладают меньшей, чем АЭ, чувствительностью, но интегрально характеризуют макроотклик образца и наглядно позволяют определить переход от одной стадии деформирования к последующей.

3) Тестирование разработанной методики контроля усталостного разрушения УКМ, основанной на оценке состояния тонкопленочного элемента (алюминиевой

фольги) с помощью комплекса информативных признаков, показало его высокую чувствительность к циклической деформации УКМ. Применение комплекса информативных признаков, предложенного для анализа оптических изображений ДДИТ, позволяет достоверно контролировать изменения рельефа фольги на протяжении всего времени циклических испытаний. Показано, что изменение всех информативных признаков имеет трехстадийный характер: первой стадии соответствует их практически неизменное значение; на второй - быстрый рост, в то время как на третьей – медленное увеличение вплоть до разрушения, что позволяет диагностировать стадию усталостного предразрушения;

4) Разработан лабораторный стенд для оценки деформации материалов методом цифровой широкографии, в рамках тестирования которого предложен информативный признак, позволяющий, подобно общепринятой фазосдвиговой методике измерения деформации, получать количественную оценку механического состояния УКМ.

5) Разработана технологическая рекомендация по проведению контроля деталей и изделий из УКМ с помощью датчика деформации интегрального типа при оценке их механического состояния в процессе циклических испытаний.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### В журналах, входящих в Перечень рецензируемых изданий

1. Панин В.Е., Панин С.В., Бяков А.В., **Бурков М.В.**, и др. Многомасштабный метод анализа деформации металлических сплавов и углерод-углеродных композиционных материалов по данным тензометрии, картирования деформации на поверхности и акустоэмиссии // Контроль. Диагностика. – 2011 – № 11. – С. 56-62.

2. Панин С.В., **Бурков М.В.**, Бяков А.В. и др. Исследование локализованной деформации при нагружении образцов из углерод-углеродного КМ с различными концентраторами напряжений по данным акусто-эмиссии, метода корреляции цифровых изображений и тензометрии // Перспективные материалы. – 2011 – №13. – С. 129-138.

3. Панин С.В., **Бурков М.В.**, Бяков А.В. и др. Стадийность деформации и разрушения при испытании на срез образцов углерод-углеродного композиционного материала по данным акустической эмиссии, корреляции цифровых изображений и тензометрии // Известия ВУЗов. Физика – 2012 – Т. 55 – №5/2 – С. 228-233.

4. Панин С.В., **Бурков М.В.**, Бяков А.В., и др. Стадийность локализованной деформации при растяжении образцов из углерод-углеродного композиционного материала с отверстиями различного диаметра по данным акусто-эмиссии, картирования деформации на поверхности и тензометрии // Дефектоскопия – 2012 – №10 – С. 57-70.

5. Панин С.В., **Бурков М.В.**, Любутин П.С., и др. Применение датчика деформации интегрального типа при циклических испытаниях композиционного материала на основе углеродных волокон // Известия ВУЗов. Физика – 2013 – Т. 56 – №12/2 – С. 182-187.

### В других изданиях

1. Панин С.В., **Бурков М.В.**, Бяков А.В., и др. Комбинированный метод исследования деформации и разрушения образцов из УУКМ по данным

акустической эмиссии, корреляции цифровых изображений и тензометрии // Вестник науки Сибири. – 2012 – №4. – <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/434/374>.

2. Panin S.V., **Burkov M.V.**, Byakov A.V., et al. Staging of a localized deformation during tension of specimens of a carbon-carbon composite material with holes of different diameters according to acoustic-emission, surface-deformation mapping, and strain-gauging data // Russian Journal of Nondestructive Testing. – Oct 2012 – V.48. – №10. – P.598-608.

### В сборниках трудов конференций

1. Панин С.В., **Бурков М.В.**, Бяков А.В. и др. Многомасштабный метод анализа деформации металлических сплавов и углерод-углеродных композиционных материалов по данным тензометрии, картирования деформации на поверхности и акустоэмиссии // Тезисы РДМК-2011, 25-29 апреля 2011, Екатеринбург, Россия. – С. 183.

2. Panin S.V., **Burkov M.V.**, Byakov A.V., et al. Multiscale technique for localized strain investigation in metal alloys and carbon fiber reinforced composites based on data of strain gauging, digital image correlation and acoustic emission. // Proc. of Mesomechanics-2011, 13th Int. Conf. – 6-8 July, 2011, Vicenza, Italy. – P. 44-47.

3. Панин С.В., **Бурков М.В.**, Бяков А.В., Любутин П.С. Применение комбинированного метода исследования локализованной деформации при нагружении образцов из УУКМ с различными концентраторами напряжений. // Тезисы докладов XIX Всероссийской конференции по НК и ТД, 6-8 сентября 2011. Самара, Россия. – С. 403-405.

4. Еремин А.В., **Бурков М.В.** Развитие оптических методов исследований деформационного поведения углепластиков: корреляция цифровых изображений и сдвиговая спекл-интерферометрия. // Сборник трудов СТТ-2012, 9-13 апреля, Томск, Россия. – Т. 1. – С. 199-201.

5. **Бурков М.В.**, Любутин П.С., Бяков А.В. Комбинированный метод исследования деформации и разрушения образцов из УУКМ по данным акустической эмиссии, корреляции цифровых изображений и тензометрии. // Сборник трудов II Всероссийской конференции «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность». – 28 мая – 1 июня, Томск, Россия. – Т. 1. – С. 70-73.

6. S. Panin, A. Byakov, **M. Burkov**, et al. Multiscale Technique for Localized Strain Investigation in Metal Alloys and Carbon Fiber Reinforced Composites Based on Data of Strain Gauging, Digital Image Correlation and Acoustic Emission. // Abstracts of 18th World Conf. on NDT, 16-20 April 2012, Durban, RSA, [http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/249\\_wcndtabstract00249.pdf](http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/249_wcndtabstract00249.pdf).

7. S. Panin, **M. Burkov**, A. Byakov, et al. Multiscale technique for strain investigation in aluminum alloy and carbon fiber reinforced composite based on data of strain gauging, digital image correlation, acoustic emission // Proc. of the 19<sup>th</sup> European Conf. on Fracture. – August 26-31, 2012, Kazan, Russia. – P. 386.

8. Панин С.В., **Бурков М.В.**, Бяков А.В. и др. Применение оптических и акустических методов неразрушающего контроля для оценки деформации КМ на основе углеродных волокон // Школа-семинар «Проблемы прочности авиационных конструкций и материалов». – 27 февраля – 2 марта, 2013 г., Новосибирск. – С. 26-28.

9. Panin S., **Burkov M.**, Byakov A., et al. Application of optical and acoustic methods for strain investigation of carbon fiber reinforced composite // Proc. of the 7<sup>th</sup> Int. conf. on airworthiness and fatigue. – 25-27 March, 2013, Beijing, China – P. 87-90.