

На правах рукописи

Бяков Антон Викторович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ИСПЫТАТЕЛЬНО-ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск-2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институт физики прочности и материаловедения СО РАН и ФГБОУ ВПО Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Научный руководитель: доктор технических наук,
доцент Панин Сергей Викторович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Смирнов Геннадий Васильевич

доктор технических наук, профессор
Недавний Олег Иванович

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

Защита состоится « 29 » ноября 2011 г. в 15-00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.09 при ФГБОУ ВПО Национальный исследовательский Томский политехнический университет по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215 (актовый зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО Национальный исследовательский Томский политехнический университет по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан « 17 » октября 2011 г.

Ученый секретарь
совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций
к.т.н., доцент



Б.Б. Винокуров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время для неразрушающего контроля (НК) материалов и элементов конструкций разработано и используется большое количество методов и средств. Помимо известных преимуществ они имеют ограничения, связанные с разрешающей способностью, временем проведения контроля, классами анализируемых объектов и материалов, чувствительностью, затратами на изготовление и эксплуатацию средств измерения. Кроме этого, существенной технической проблемой является автоматизация измерений при обработке большого количества данных, что приводит к необходимости применения более быстродействующих, и, зачастую, менее чувствительных методов.

Классическим экспериментальным, а также широко используемым в промышленности прямым методом оценки деформации является тензометрия. Метод позволяет измерить интегральное значение деформации либо по образцу в целом, либо в отдельных участках изделия. На рынке радиоэлектронной измерительной аппаратуры представлен широкий спектр современных датчиков и приборов, обеспечивающих при измерении деформации высокие показатели точности и быстродействия. В тоже время при использовании в испытательных машинах данный метод обеспечивает получение, преимущественно, интегральной оценки деформации.

Перспективным подходом для изучения процессов, а также количественной оценки деформации структурно-неоднородных материалов (металлов, сплавов, керамических материалов и т.п.) является, разработанная в ИФПМ СО РАН оптико-телевизионная измерительная система TOMSC. Ее принцип действия заключается в построении полей векторов перемещений с последующим расчетом компонент деформации путем численного дифференцирования. Данный подход основан на расчете оптического потока и именуется в зарубежной литературе как метод корреляции цифровых изображений (DIC) или картирования деформации на поверхности. Существенный вклад в развитие исследований в данном направлении принадлежит Б.К.П. Хорну, У.К. Прэтту, М. Саттону и др. С помощью данного метода можно с высокой степенью локальности и точности оценить значения деформации на поверхности образца.

В тоже время метод корреляции цифровых изображений основан на обработке изображений поверхности и не позволяет анализировать деформацию в объеме исследуемого объекта. Этого недостатка лишен метод акустической эмиссий (АЭ), который позволяет путем регистрации событий АЭ обнаружить развивающиеся дефекты, определить их координаты и предсказать возможное разрушение. Метод АЭ помимо функции НК и технической диагностики широко используется для исследований различных процессов в реальном времени. Большой вклад в развитие данного метода внесли: Тэтто К.А., Грин А.Т., Данеган Х., Дробот Ю.Б., Ключев В.В., Иванов В.И., Ермолов И.Н., Семашко Н.А. и др.

В этой связи для проведения экспериментальных исследований с целью получения оценки механического состояния материала требуется одновременное использование датчиков различного вида и принципа действия. Подобные подходы описаны в литературе. Так в коллективе под руководством профессора Степановой Л.Н. (СибНИА им. С.А. Чаплыгина) для экспериментальных исследований деформации и разрушения материалов и элементов конструкций совместно при-

меняют такие методы как АЭ и тензометрия. Под руководством профессора Зуева Л.Б. в ИФПМ СО РАН проводят изучение пластического течения на макромасштабном уровне с помощью методов спекл-интерферометрии и ультразвукового контроля. В коллективе профессора Горкунова Э.С. в ИМАШ УрО РАН совместно используют тензометрию, магнитный метод и измерение электропроводности. В ИМСС УрО РАН в группе профессора Наймарка О.Б. совместно применяют АЭ и термометрию.

В настоящей работе для исследования процессов деформации и разрушения предлагается комбинирование методов АЭ, картирования деформации на поверхности и тензометрии. Указанные методы позволяют получить интегральную оценку интенсивности развития деформации в течение всего времени испытаний, взаимно дополняют друг друга и не вносят ошибку в измерения при их одновременном использовании, поскольку являются пассивными методами регистрации.

Таким образом, актуальной научно-технической проблемой является разработка алгоритмического и аппаратно-программного обеспечения, позволяющего проводить одновременно регистрацию данных АЭ, изображений поверхности и тензометрии с последующей обработкой и анализом результатов испытаний. Кроме того, для интерпретации независимых и различных по природе и принципу получения данных необходимо разработать методику их совместного анализа, основанную на выделении характерных стадий изменения регистрируемых информативных параметров.

Целью настоящей работы является разработка и исследование функционирования испытательно-диагностических комплексов (ИДК) для регистрации, обработки и анализа данных АЭ, оптических изображений поверхности и тензометрии образцов конструкционных материалов, реализующих стадийный многомасштабный подход к анализу результатов их механических испытаний.

Для достижения поставленной цели, необходимо было решить следующие задачи:

1) разработать схему ИДК, обеспечивающего проведение стадийного многомасштабного исследования механического поведения образцов конструкционных материалов путем одновременной регистрации данных тензометрии и генерации АЭ, а также расчета карт деформации на поверхности;

2) разработать несколько вариантов ИДК для комбинированного исследования деформации на базе электромеханических и сервогидравлической испытательных машин и экспериментально исследовать их функционирование в условиях статического и циклического растяжения;

3) разработать и протестировать алгоритмы и программы регистрации, обработки и анализа данных АЭ и провести диагностику функционирования блока регистрации АЭ путем обработки модельных и экспериментальных сигналов;

4) разработать и провести экспериментальное исследование функционирования ИДК на базе универсальной электромеханической испытательной машины Instron-5582, принцип действия которого основан на выделении характерных стадий изменения информативных параметров;

5) на основе разработанных аппаратных и программных средств предложить методику диагностики усталостного разрушения образцов конструкционных мате-

риалов в приложении к созданию оптического метода неразрушающего контроля деталей ответственного назначения.

Научную новизну работы определяют:

1) результаты экспериментальных исследований функционирования ИДК, полученные путем одновременной регистрации данных АЭ, картирования деформации на поверхности и тензометрии, позволившие выбрать в качестве взаимодополняющих и одновременно анализируемых информативных параметров: активность АЭ, интенсивность деформации сдвига и производную внешней нагрузки по времени;

2) совокупность результатов исследований образцов конструкционных материалов, показавшая возможность и эффективность совместного анализа значений информативных параметров, полученных с датчиков различного принципа действия и основанные на выделении характерных стадий их изменения;

3) результаты тестирования алгоритмов и программ регистрации, обработки и анализа модельных данных АЭ, подтвердившие корректное функционирование блока регистрации АЭ и рекомендуемые для его калибровки и контроля работоспособности.

Практическую ценность работы составляет:

1) программное обеспечение для одновременной автоматизированной регистрации данных АЭ, изображений поверхности и тензометрии при циклическом нагружении образцов конструкционных материалов;

2) алгоритмическое и программное обеспечение для записи, обработки и анализа сигналов АЭ, а также варианты реализации методик калибровки лабораторного стенда регистрации АЭ;

3) варианты реализации комплексов для комбинированного исследования деформации по данным АЭ, картирования деформации поверхности и тензометрии на базе испытательных машин ИМАШ-2078, Instron-5582, Biss UTM150;

4) методика оптического контроля усталостного разрушения высоконагруженных узлов планера самолета, основанная на оценке состояния чувствительного элемента (фольги).

Методы исследования. В качестве основных методов исследования в работе использованы методы цифровой обработки и анализа сигналов и изображений, теории вероятности, математической статистики, теории оптимизации, теории принятия решений, физического моделирования.

Внедрение работы. Разработанные аппаратно-программные комплексы реализованы на базе испытательных машин, находящихся на балансе в ИФПМ СО РАН, и используются для проведения исследований конструкционных материалов и сплавов в рамках различных госбюджетных и внебюджетных программ и проектов. На программы регистрации и обработки данных АЭ, а также обработки оптических изображений поверхности с помощью вейвлет-преобразования получены акты о регистрации программного обеспечения в Роспатенте.

Автор принимал участие в качестве ответственного исполнителя 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 Учреждением Российской академии наук Институт физики проч-

ности и материаловедения СО РАН. Полученные результаты подтверждены соответствующим актом внедрения.

Апробация работы. Основные результаты работы отражены в 19 публикациях: 6 статей в рецензируемых журналах, 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ, 12 статей и тезисов докладов в сборниках конференций. Результаты работы были представлены на следующих конференциях: XIV, XV, XVI Международные конференции молодых ученых «Современные техника и технологии», 2008-2010 гг., Томск; Всероссийская конференция молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2008», 5–8 мая, 2008 г., Томск; Third International Forum on Strategic Technologies (IFOST), June 23-29, 2008 Novosibirsk-Tomsk, Russia; VIII Всероссийская школа-семинар «Новые материалы. Создание структура, свойства - 2008», 9-11 июня, 2008 г., Томск; Международная школа-семинар «Многоуровневые подходы в физической мезомеханике. Фундаментальные основы и инженерные приложения», 9-12 сентября, 2008 г., Томск; Всероссийская конференция «Новые материалы и технологии» НМТ-2008», 11-12 ноября, 2008 г., Москва; IV Международная конференция «Современные проблемы машиностроения», 26-28 ноября, 2008 г., Томск; VII Всероссийская конференция «Современные информационные технологии в науке, образовании и практике», 27-28 ноября, 2008 г., Оренбург; «Mesomechanics 2009. Dissipation and Damage across Multiple Scales in Physical and Mechanical Systems», 24-26 June, 2009, Oxford, UK; International Forum on Strategic Technologies (IFOST), October 21-23, 2009, Ho Chi Minh, Vietnam; Международная конференция «Повреждение материалов при эксплуатации, методы его диагностики и прогнозирования», 21-24 сентября 2009 г., Тернополь, Украина; Международная конференция по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов, 7-11 сентября, 2009 г., Томск; 10 th European Conference on Non-Destructive Testing, 7-11 June, 2010 Moscow; 12 th «International Congress on Mesomechanics at National Taiwan University of Science and Technology», June 21-25, 2010, Taipei, Taiwan; «Ресурс и диагностика материалов и конструкций – 2011». Екатеринбург 25-29 апреля, 2011 г.; Mesomechanics-2011, 13th International Conference, Vicenza, Italy 6-8 July, 2011; 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, Самара, 6 – 8 сентября 2011 г. Основное содержание диссертации приведено в работах [1-7].

Личный вклад. Автором разработана блок-схема ИДК исследования деформации и разрушения, вариант реализации лабораторного комплекса для комбинированного исследования деформации по данным акустической эмиссии, картирования деформации на поверхности и тензометрии на базе сервогидравлической испытательной машины BiSS UTM 150. Совместно с научным руководителем выполнена постановка задач диссертационного исследования, анализ и обсуждение результатов теоретических и практических исследований. Автором разработаны и созданы программы регистрации, обработки и анализа данных АЭ и реализованы методики калибровки блока АЭ. Проведены экспериментальные исследования стадийности изменения информативных параметров при растяжении образцов алюминиевого сплава Д16АТ с концентраторами напряжений различной формы и размера. В составе авторского коллектива разработана методика диагностики

усталостного разрушения авиационных материалов по данным изменения рельефа поверхности чувствительного элемента (фольги).

Основные положения, выносимые на защиту:

1) структурная схема ИДК для комбинированного исследования деформации по данным регистрации АЭ, расчета карт деформации на поверхности и тензометрии;

2) варианты реализации лабораторных комплексов для комбинированного исследования деформации на базе двух электромеханических (ИМАШ-2078 и Instron-5582) и сервогидравлической (Biss UTM 150) испытательных машин и совокупность результатов экспериментальных исследований их функционирования при статическом и циклическом растяжении образцов конструкционных материалов;

3) разработанный (в соавторстве) аппаратно-программный блок регистрации, обработки и анализа данных АЭ и результаты его калибровки и тестирования при обработке модельных и экспериментальных сигналов;

4) способ совместного анализа данных в ИДК, основанный на одновременном выделении и сопоставлении характерных стадий изменения информативных параметров: активности АЭ, интенсивности деформации сдвига и производной нагрузки по времени нагружения.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 33 работы, из них 7 статей в рецензируемых журналах рекомендуемых ВАК. 26 статей и тезисов докладов в сборниках конференций. Получено 3 свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ, имеется 1 акт о внедрении.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Она изложена на 181 странице, содержит 61 рисунок, 17 таблиц, 5 приложений. Список литературы содержит 95 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе диссертации проведен аналитический обзор экспериментальных *in situ* методов исследования процессов деформации и разрушения, а также их комбинированного использования совместно с акустическими методами НК. Рассмотрены работы по использованию тензометрии и АЭ для раннего обнаружения развивающихся дефектов; комбинировании термометрии и АЭ с последующим установлением взаимосвязи между генерацией АЭ и скоростью выделения тепла и др. Приведен обзор аппаратуры для регистрации АЭ; рассмотрена классификация преобразователей АЭ. Проанализированы экспериментальные методы изучения деформации и разрушения на мезомасштабном уровне, основанные на анализе стадийности.

Вторая глава посвящена описанию разработанного аппаратно-программного комплекса для регистрации, обработки и анализа сигналов АЭ. Приведена реализация 3-х вариантов ИДК для комбинированного исследования деформации на базе электромеханических и сервогидравлической испытательных

машин, предназначенных для изучения деформации в условиях статических и циклических нагрузок.

Разработку аппаратуры проводили с использованием следующих узлов, доступных на рынке радиоэлектронных компонентов и сенсоров: акусто-эмиссионный датчик GT-200 с коэффициентом электроакустического преобразования не менее 60 дБ (ООО «ГлобалТест», г. Саров); малошумящий источник питания – щелочной аккумулятор с амплитудой собственных шумов порядка 1 мВ (Varta, Германия); 14-ти разрядная плата АЦП «ЛА-н150-14РСИ» (ЗАО «Руднев-Шиляев», г. Москва). Поскольку имеющиеся готовые аппаратные решения широкополосных малошумящих усилителей различных производителей были неудовлетворительными по уровню шумов, в соавторстве был спроектирован и реализован собственный вариант усилителя. Характеристики разработанной модели обеспечивали коэффициент усиления порядка 54 дБ при уровне собственных шумов менее 12 мкВ, что полностью соответствовало расчетным параметрам, а усилитель удовлетворял заданным условиям проведения экспериментальных исследований.

Тестирование созданного лабораторного стенда проводили с использованием различных источников модельных сигналов, в частности, генератора синусоидальных сигналов ГЗ-111 с блоком модуляции несущего сигнала, собранного на базе несимметричного мультивибратора и датчика GT-200, используемого в качестве излучателя. Излучатель устанавливали на металлический конус, необходимый для локализации акустического излучения в точке его соприкосновения с пластиной (для имитации точечного источника АЭ). Испытания проводили при расположении излучателя и приемника друг напротив друга.

Показано (рис. 1, а), что: а) в частотном спектре зарегистрированного сигнала присутствует максимум, частота которого соответствует таковой для сигнала, подаваемого на вход АЭ-датчика; б) независимо от частоты подаваемого сигнала в спектре принятого также присутствует максимум $f \approx 180$ кГц, соответствующий резонансной частотой датчика АЭ; в) в диапазоне частот менее $f \leq 100$ кГц и более $f \geq 250$ кГц максимум, соответствующий частоте подаваемого сигнала, в спектре является менее выраженным, что связано с нелинейностью АЧХ АЭ-датчика GT200.

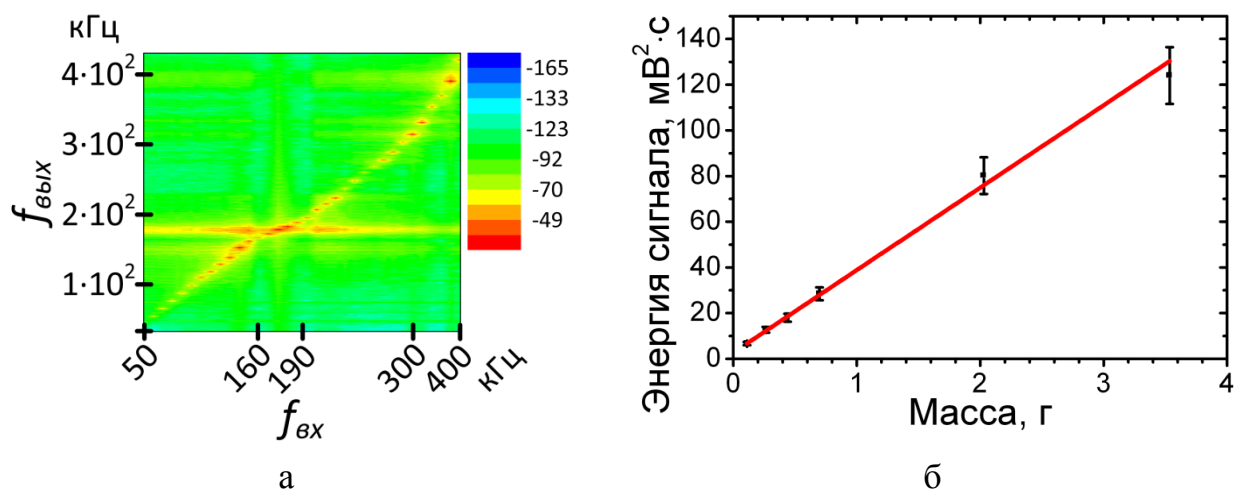


Рис. 1. - Энергия спектра зарегистрированного сигнала в зависимости от частоты входного сигнала (а) и зависимость энергии спектра сигнала АЭ от массы падающего шарика (б)

Для калибровки АЭ датчиков формировали модельный сигнал в виде акустической волны, возникающей при падении стального шарика. Энергия сигнала может быть рассчитана по формуле

$$E_{AE} = \int_0^T V(t)^2 dt$$

где $V(t)$ - напряжение от датчика АЭ зависящее от времени t и T - длительность импульса (АЭ).

Результаты расчета, показали, что энергия сигнала (упругой волны), возбуждаемой при падении стального шарика на пластину из Д16АТ, изменяется линейно с возрастанием массы шарика (рис. 1, б). Данная методика предлагается для использования в качестве экспресс метода калибровки прибора перед началом проведения измерений.

В работе предложена обобщенная схема (см. рис. 2) ИДК, спроектированная с учетом следующих требований:

- для повышения четкости и контрастности изображении поверхности объекта контроля (ОК) необходимо исключить его перемещения и вибрации в момент фотосъемки;
- следует поддерживать постоянный уровень освещенности ОК с учетом изменения рельефа на его поверхности и направления освещения;
- требуется производить синхронизацию процесса съемки изображений поверхности ОК с работой блока нагружения испытательной машины на протяжении всего эксперимента;
- следует производить регистрацию сигналов АЭ и данных тензометрии на протяжении всего времени эксперимента с фиксацией времени записи данных.

В соответствии с вышеизложенным, для контроля блока управления фотографированием и записью изображений поверхности в схеме присутствуют необходимые управляющие связи с блоками освещения и управлением испытательной машиной (рис. 2). Описанные ниже варианты реализации ИДК спроектированы с учетом предложенной схемы.

Первая реализация ИДК была выполнена на базе электромеханической машины ИМАШ-2078 и ранее созданной в ИФПМ СО РАН оптико-телевизионной измерительной системы ТОМСС. Для регистрации, обработки и анализа сигналов АЭ был использован аппаратно-программный комплекс, описанный выше.

В ходе проведения ряда экспериментов, с использованием предложенного ИДК, был выявлен ряд его недостатков: а) невозможность работы в автоматическом режиме (требовалось участие оператора); б) регистрация диаграмм нагружения проводилась с помощью аналогового регистратора (самописца); в) время расчета компонент деформации, а также помехоустойчивость вычислений были неудовлетворительны. С целью устранения указанных недостатков было доработано ПО, что позволило выделять на анализируемых изображениях расчетные области. В результате удалось сократить время обработки изображений поверхности и расчета значений интенсивности деформации сдвига (ИДС), примерно в 4 раза. Также удалось снизить количество ложных максимумов ИДС, связанных с ошибочным определением векторов перемещений на краях образца и в областях, соответствующих концентраторам напряжений и несплошностям (трещинам).

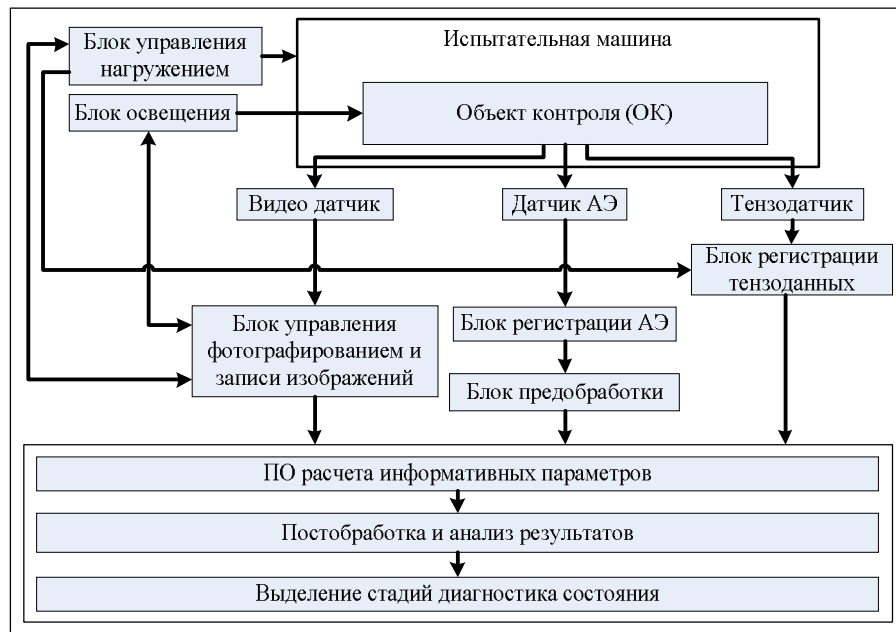


Рис. 2. - Обобщенная схема ИДК исследования деформации и разрушения

Для устранения аппаратных недостатков было принято решение создать новый ИДК на базе электромеханической испытательной машины Instron-5582, не оборудованной микроскопом и требующей дооснащения оптическим методом регистрации изображений поверхности. Регистрация данных производится с использованием следующих сенсоров: видеодатчик (Д1), преобразователь АЭ (Д2) и тензодатчик (Д3). В качестве датчика Д1 использована фотокамера Canon EOS 450D, оснащенная длиннофокусным объективом Canon EF-S 55-250 мм f/4-5.6 IS. Тензодатчик (силоизмеритель) входил в состав испытательного оборудования (см. рис. 3, а).

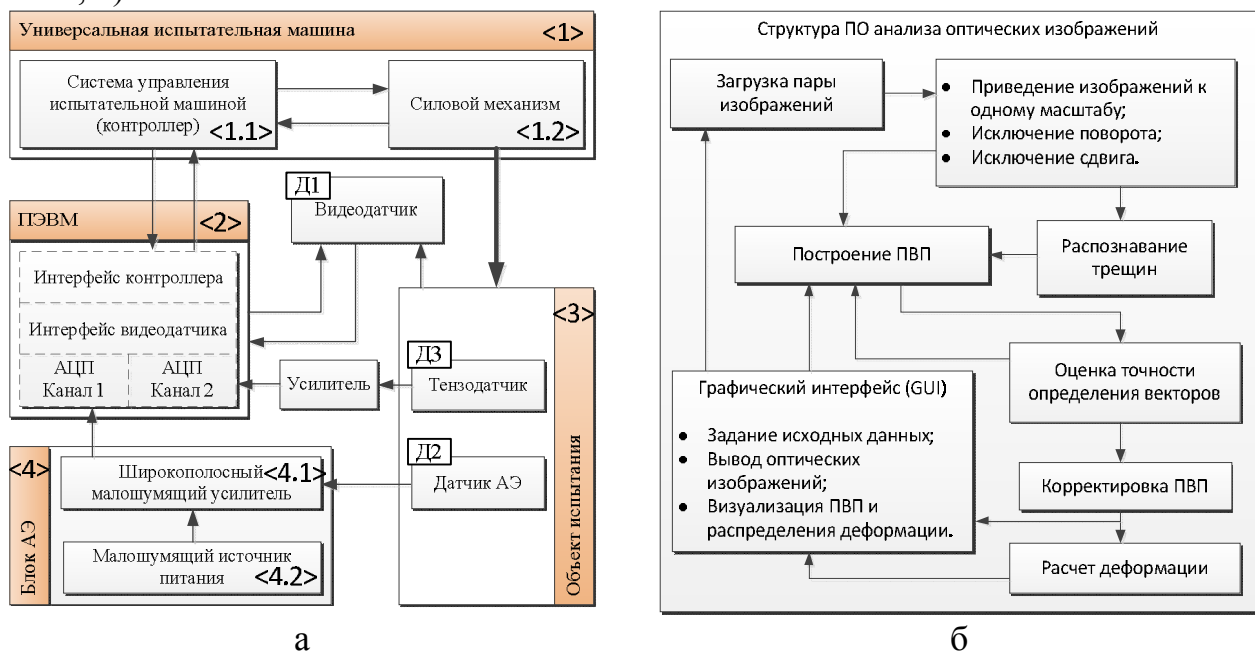


Рис. 3. - Схема испытательно-диагностического комплекса на базе Instron-5582 (а) и структура ПО анализа оптических изображений (б)

Принцип действия данного ИДК заключается в следующем. Универсальная испытательная машина обеспечивает нагружение образца с заданной постоянной скоростью перемещения активного захвата и измерение нагрузки и перемещения с погрешностью не более 0.5 % от измеряемой величины. Фотографирование поверхности образца осуществляли через равные промежутки времени. Выбор временного интервала осуществляется исходя из скорости нагружения, а также свойств материала. Регистрацию сигналов АЭ производили по превышению величины порога дискриминации. Сбор данных АЭ осуществляли на протяжении всего времени эксперимента.

В составе оптического метода оценки деформации лежит построение поля векторов перемещений участков поверхности образца и дальнейшее его дифференцирование для расчета компонент деформации. Анализ последней проводили путем расчета среднего значения ИДС, нормированного на время между записью пары изображений γ_i [6]

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

В общем виде схема работы программного обеспечения для анализа оптических изображений приведена на рис. 3, б.

Подавляющее большинство аварий и катастроф на практике связано с усталостным разрушением. По этой причине экспериментальное исследование процессов усталости конструкционных материалов является крайне актуальным. Для проведения циклических испытаний, как правило, используют сервогидравлические испытательные машины. В работе была поставлена задача, на базе серийного образца такой машины, создать исследовательский стенд для исследования усталостного разрушения комбинацией методов АЭ, картирования деформации на поверхности и тензометрии. В состав ИДК входят следующие блоки: испытательная машина UTM150 (BiSS, Индия), фотокамера EOS 450D, стенд регистрации АЭ, персональный компьютер для фиксации, обработки и визуализации данных, а также управления периферийными устройствами.

Спецификой циклических испытаний является регулярное удлинение образца подвижным захватом испытательной машины. По этой причине фотографирование должно быть произведено синхронно с перемещением захвата при минимальном удлинении образца (для оценки его остаточной деформации). Для решения поставленной задачи была разработана схема синхронизации при фотографировании поверхности образца в процессе приложения циклической нагрузки (рис. 4). Программная реализация для ПК представленной схемы позволяет автоматически, с учетом данных обратной связи, формировать управляющие сигналы. Отметим, что возможность управлять работой испытательной машины появилась благодаря использованию функции глобального доступа к памяти (Global Data Sharing), которую обеспечивает ПО контроллера серии 2370SS.

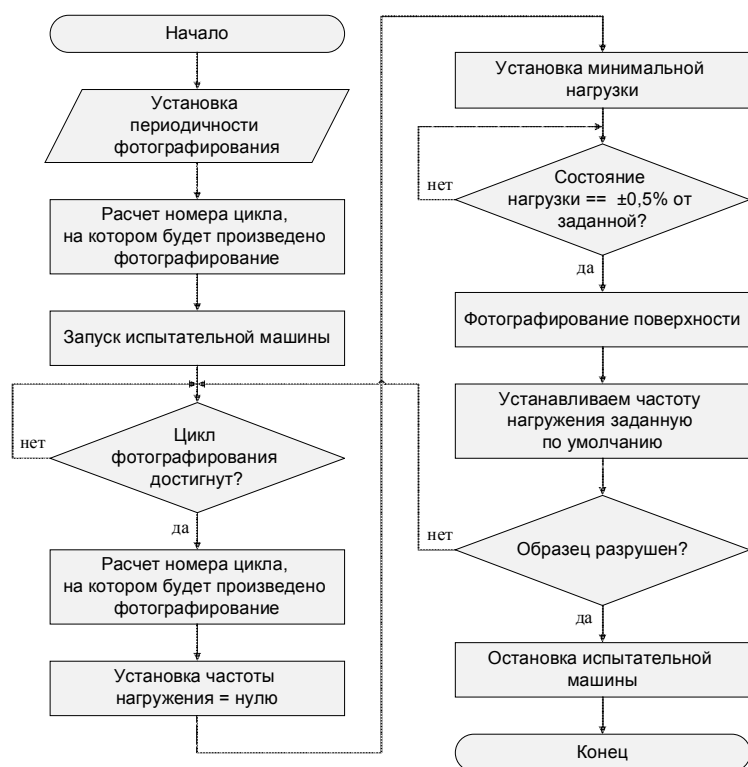


Рис. 4. - Блок-схема программы синхронизации приложения циклической нагрузки и фотографирования образца

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований, полученные с помощью ИДК на базе машины ИМАШ-2078. Испытания образцов алюминиевых сплавов АМг6АМ, Д16АТ, а также азотированных образцов стали 12Х18Н10Т с различной толщиной упрочненного поверхностного слоя проводили при статическом растяжении.

Основой при выделении стадийности был график производной нагрузки по времени нагружения, как наиболее интегральная характеристика деформирования материала. Показано, что для сплава Д16АТ типичным является наличие 4-х характерных стадий его изменения, причем первая из них соответствует упругой деформации, а последняя макролокализации в шейке. Подобные же 4 стадии изменения информативных параметров выявлены для графика активности АЭ, а также ИДС. При этом продолжительность стадий во времени хорошо согласуется для данных тензометрии и картирования деформации на поверхности, и несколько отличается для данных АЭ. Активность акустической эмиссии рассчитывали по формуле

$$N'_{\Sigma} = \frac{dN_{\Sigma}}{dt}$$

Аналогичная 4-х стадийная картина изменения параметра $d\sigma/dt$ проявляется при растяжении гладких образцов сплава АМг6АМ. Однако в отличие от образцов сплава Д16 характер изменения информативных параметров dN/dt и γ отличался как по знаку, так скорости. Тем не менее, в пределах выделенных стадий изменение анализируемых параметров имело постоянный характер.

Поверхностное упрочнение металлов и сплавов является эффективным способом защиты их поверхности от механических и климатических воздействий. В то же время при нагружении в покрытии могут возникать трещины, являющиеся модельными источниками АЭ. В работе было проведено исследование поведения

при нагружении образцов стали 12X18H10T с упрочненным поверхностным слоем различной толщины. Аналогично выше описанным методикам проводили выделение характерных стадий изменения информативных параметров; в качестве контрольного вновь использовали зависимость производной внешней нагрузки по времени от степени деформации. Для образцов без поверхностного упрочнения было выделено 4 стадии (рис. 5, а). Сразу отметим, что стадийность изменения параметров тензометрии и АЭ по характеру и длительности достаточно хорошо соответствовала друг другу, в то время как по данным оптического метода измерения деформации такой стадийности выявить не удалось (рис. 5, а-3).

Стадия I соответствует упругой деформации и сопровождается возрастанием величины производной $d\sigma/dt$. С точки зрения АЭ данная стадия характеризуется наибольшей активностью dN/dt . На стадии II (параболического упрочнения) значение $d\sigma/dt$ снижается. В то же время активность АЭ ниже, чем на предыдущей стадии I. На стадии III (слабого линейного упрочнения) коэффициент деформационного упрочнения продолжает снижаться и уменьшается активность АЭ. Наконец стадия IV соответствует формированию шейки. Активность АЭ несколько возрастает по сравнению со стадией III.

В образце с азотированным слоем толщиной 30 мкм было выделено максимальное количество стадий, равное 6. Вновь количество и продолжительность стадий по данным тензометрии и АЭ соответствовало друг другу, в то время как для данных картирования деформации на поверхности удалось выделить лишь две стадии изменения ИДС.

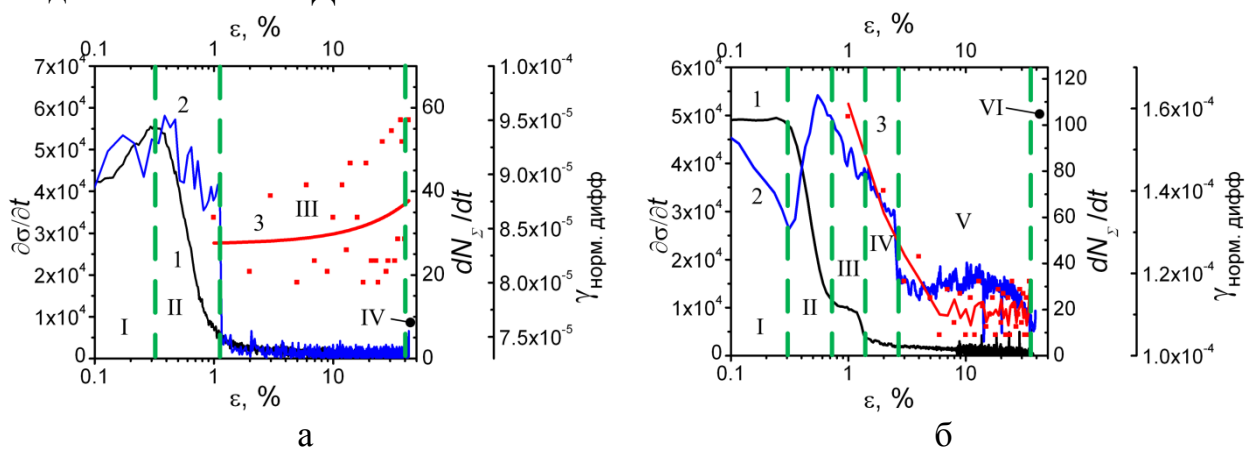


Рис. 5. — Зависимость производной внешней нагрузки по времени $d\sigma/dt$ (1), активность сигналов АЭ dN/dt (2), и зависимость интенсивности деформации сдвига от времени γ (3) в образце стали 12X18H10T без азотированного поверхностного слоя (а) и с упрочненным поверхностным слоем толщиной 30 мкм (б)

Стадия I подобно всем вышеописанным образцам относится к упругой деформации. Стадия II (параболическое упрочнение) сопровождается снижением коэффициента деформационного упрочнения; при этом активность АЭ максимально возрастает. Появление двух следующих стадий III и IV связано с процессом растрескивания азотированного слоя. Наконец, стадии V и VI аналогичны стадиям III и IV для образца без поверхностного упрочнения. По данным оптического метода выявлено лишь две стадии изменения ИДС (рис. 5, б-3). По нашему мнению столь малое количество стадий, выявленное при использовании оптического метода,

связано с несовпадением области измерения деформации и места ее локализации. Таким образом, в следующей главе помимо использования ИДК на базе Instron при постановке эксперимента были выбраны образцы, содержащие концентратор напряжений, локализирующий развитие деформации в определенной области образца, в которой и проводили измерение ИДС.

В четвертой главе изложены экспериментальные результаты тестирования ИДК разработанного на базе электромеханической испытательной машины Instron-5582. Проведены испытания образцов алюминиевого сплава Д16АТ с различными типами концентраторов: надпил, отверстие, 3-и полукруглых надреза, разнесенных на различное расстояние. Изменяя тип концентратора и варьируя его размеры, формировали различное напряженно-деформированное состояние материала.

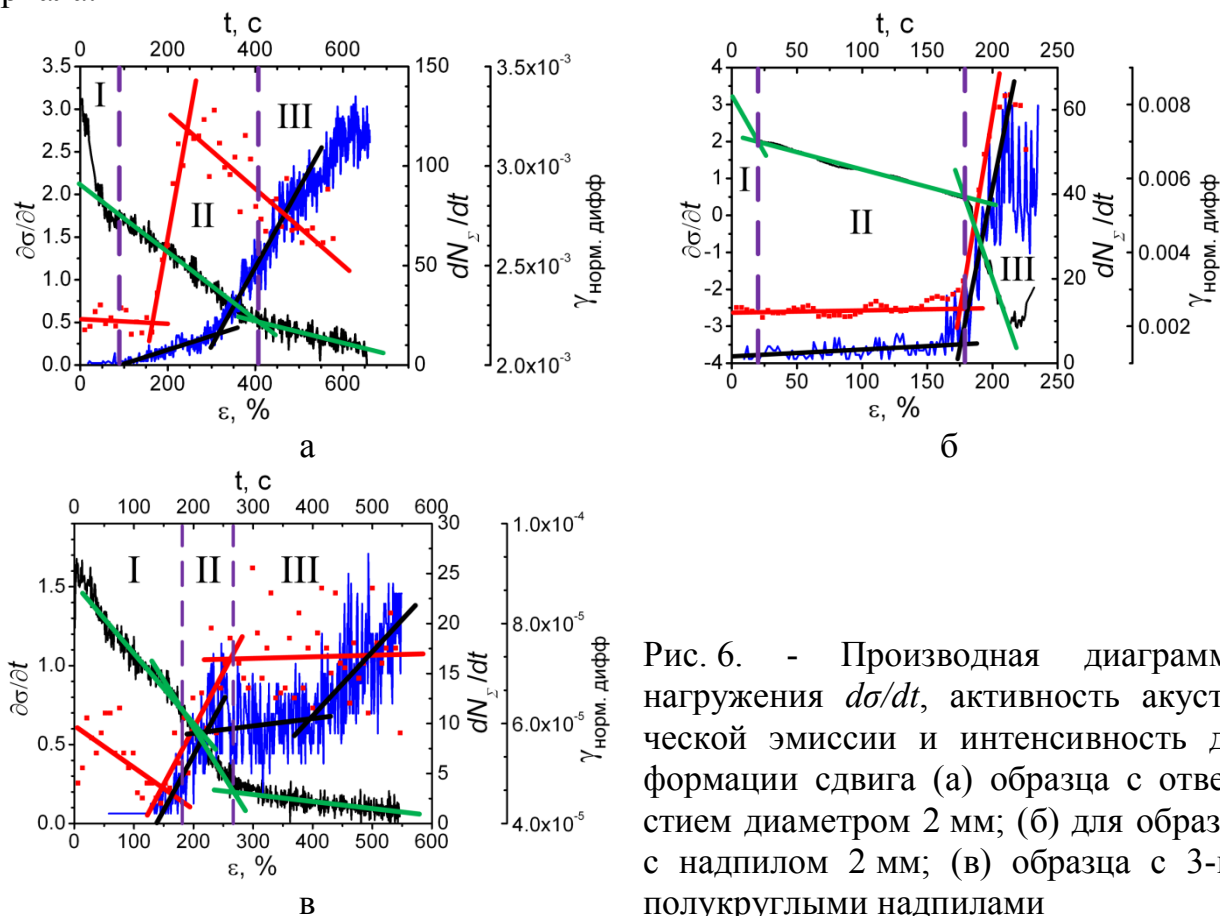


Рис. 6. - Производная диаграммы нагружения $d\sigma/dt$, активность акустической эмиссии и интенсивность деформации сдвига (а) образца с отверстием диаметром 2 мм; (б) для образца с надпилем 2 мм; (в) образца с 3-мя полукруглыми надпилами

Образцы Д16 с отверстием. Подобно приведенным выше данным стадийность развития деформации определяли, прежде всего, по данным тензометрии. Полученные при растяжении образцов с отверстием различного диаметра данные, позволили выявить наличие 3-х характерных стадий (см. рис. 6, а). Стадия I связана, преимущественно с упругой деформацией; стадия II характеризует постепенное ее накопление в области концентратора напряжений; стадия III соответствует началу макролокализации деформации и предшествует разрушению. По данным картирования деформации на поверхности также удастся выявить три стадии изменения информативного параметра – ИДС. Однако время перехода от первой ко второй, а затем от второй к третьей стадии для него отличается от данных тензометрии, что может быть связано как с разрешением оптической системы (в первом

случае), так и с его большей чувствительностью к развитию локализованной деформации (во втором). По данным АЭ также можно отметить три участка изменения активности АЭ, выделяемые по результатам кусочно-линейной аппроксимации соответствующего информативного параметра. Однако их длительность также не соответствует стадийности по данным тензометрии, что наиболее вероятно связано с чувствительностью каждого из методов к различным масштабам и механизмам деформации.

Образцы Д16 с надпиллом. Анализ данных тензометрии для образцов с надпиллом различной глубины также показал наличие 3-х стадий (рис. 6, б). При этом стадия I соответствует упругой деформации; стадия II характеризует пластическое деформирование, в то время как стадия III связана с распространением трещины (разрушением). Анализ двух других информативных параметров также показал, что стадийный характер их изменения хорошо согласуется со стадийностью по данным тензометрии, за исключением того, что переход от стадии I к стадии II является слабо выраженным. Данный результат наиболее вероятно связан с невысоким разрешением оптической системы, а также высоким порогом дискриминации сигналов АЭ, использовавшимся при их регистрации. Таким образом, в случае значительной локализации деформации наблюдается наилучшее соответствие между характерными стадиями изменения информативных параметров, отражающих развитие деформации и разрушение.

Образцы Д16 с 3-мя надрезами. Нанесение трех полукруглых надрезов не меняет концентрацию напряжений в их вершине (как в двух предыдущих случаях), однако за счет изменения расстояния между ними позволяет менять напряженно-деформированное состояние в образцах. Анализ экспериментальных результатов показал (см. рис. 6, в), что по данным тензометрии путем кусочно-линейной аппроксимации можно выделить 3 характерные стадии изменения производной внешней нагрузки по времени. Для данных оптического метода измерения деформации характерны такие же три стадии изменения ИДС, которые по времени хорошо совпадают с результатами анализа диаграммы нагружения (рис. 6, в). С другой стороны, аналогично испытаниям образцов с отверстием, выделенные три стадии изменения активности АЭ по времени и продолжительности не совпадают с данными тензометрии. По всей видимости, это также связано с особенностями генерации АЭ в условиях локализованной деформации, которая в данном случае проявляется в виде формирования двух макрополос локализованного сдвига.

В пятой главе проводится описание результатов разработки оптического способа диагностики применительно к высоконагруженным агрегатам планера самолетов типа СУ-27. В рамках НИР «Разработка оптического метода встроенного контроля высоконагруженных агрегатов планера» между ИФПМ СО РАН и ОАО «ОКБ Сухого» было предложено использовать в качестве чувствительных элементов для диагностики состояния элементов конструкции планера датчики-фольги. Состояние поверхности фольги при этом фиксируется с помощью видеодатчика.

Для решения поставленных задач также требовалось использование аппаратуры для регистрации данных АЭ, как независимого источника данных о развитии деформационных процессов в циклически нагружаемых образцах, а также устрой-

ства регистрации и передачи видеоинформации, на основе которого должен быть создан датчик состояния.

Испытания образцов и регистрации данных проводилась с использованием ИДК на базе испытательной машины UTM150 (BiSS, Индия). В процессе циклического растяжения были получены серии оптических изображений поверхности фольги. В рамках разработки оптического метода контроля реализуется несколько этапов получения, обработки и интерпретации данных. Количественная обработка экспериментальных данных, помимо оценки ИДС γ , основана на оценке деформационного рельефа посредством расчета фрактальной размерности, энергии амплитудного Фурье спектра в области низких пространственных частот и энергии вейвлет спектра мощности вдоль направлений X и Y (которые в данном случае и являются информативными параметрами).

Оценка текущего механического состояния производится путем сопоставления значений рассчитанных информативных параметров с данными калибровочных таблиц, получаемых в ходе предварительных экспериментальных исследований различных материалов в условиях нагружения, близких к эксплуатационным. В работе были сформулированы технологические рекомендации по проведению оптического контроля механического состояния для образцов алюминиевого и титанового сплава, а также высокопрочной стали.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате выполнения диссертационной работы получены следующие основные научные и практические результаты:

1) предложен способ и схема ИДК для комбинированного исследования деформации и разрушения материалов и изделий путем одновременной регистрации данных АЭ, оптических изображений поверхности и тензометрии, и последующем выделении характерных стадий изменения их информативных параметров;

2) на базе серийных испытательных машин реализованы три варианта лабораторных комплексов для комбинированного исследования деформации. Проведено их тестирование в условиях статического и циклического растяжении образцов конструкционных материалов, подтвердившее правомочность использования стадийного подхода при комбинированном методе исследования деформации;

3) разработано алгоритмическое и программное обеспечение блока регистрации, обработки и анализа сигналов АЭ. Предложены и реализованы методики его калибровки и тестирования при обработке модельных и экспериментальных сигналов, показавшие корректность получаемых данных;

4) проведены систематические исследования стадийности изменения информативных параметров (активности АЭ, ИДС и производной внешней нагрузки по времени) при растяжении образцов сплава Д16АТ с различными концентраторами напряжений. Полученные данные положены в основу методики оценки механического состояния нагруженных материалов, основанной на установлении соответствия стадий изменения всех трех информативных параметров;

5) в рамках создаваемого оптического метода неразрушающего контроля предложена и реализована методика диагностики усталостного разрушения образцов авиационных материалов, основанная на анализе состояния чувствительного

элемента (фольги), путем расчета информативных параметров (фрактальной размерности, энергии Фурье и вейвлет спектра мощности).

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ (в изданиях, рекомендованных ВАК)

1. Панин С.В., **Бяков А.В.**, Гренке В.В. и др. Многомасштабное исследование стадийности локализованной пластической деформации при растяжении образцов сплава Д16АТ с надрезами акустико-эмиссионным и оптико-телевизионным методами. // Физическая мезомеханика. - 2009. - Т. 12. - №6. - С. 63-72.

2. Башков О.В., Панин С.В., **Бяков А.В.** Исследование влияния толщины азотированного поверхностного слоя на стадийность деформации и разрушения стали 12Х18Н10Т методом акустической эмиссии, корреляции цифровых изображений и анализа диаграмм нагружения. // Физическая мезомеханика. – 2010. - Т. 13. - № 6. - С. 53-72.

3. Панин С.В., **Бяков А.В.**, Гренке В.В., Шакиров И.В., Башков О.В. Разработка и испытание лабораторного стенда регистрации и анализа данных акустической эмиссии. Автометрия. – 2011. – Т. 47. - №1. - С. 115-128.

4. Панин С.В., **Бяков А.В.**, Любутин П.С., Башков О.В. Стадийность локализованной пластической деформации при растяжении образцов сплава Д16АТ по данным акусто-эмиссии, картирования деформации на поверхности и тензометрии. Часть 1. Образцы с отверстиями различного диаметра. Дефектоскопия, 2011, №9. – С. 47-61.

5. Панин С.В., **Бяков А.В.**, Любутин П.С., Башков О.В. Стадийность локализованной пластической деформации при растяжении образцов сплава Д16АТ по данным акусто-эмиссии, картирования деформации на поверхности и тензометрии. Часть 2. Образцы с надпилами различной глубины. Дефектоскопия, 2011, №12 (принято к печати).

6. Панин С.В., **Бяков А.В.**, Любутин П.С. и др. Многомасштабный метод изучения деформации и разрушения нагруженных твердых тел по данным акустической эмиссии, корреляции цифровых изображений и тензометрии. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2011, Т. 77, №9. С. 50-59.

7. Панин В.Е., Панин С.В., **Бяков А.В.**, Бурков М.В., Любутин П.С. Многомасштабный метод анализа деформации металлических сплавов и углерод-углеродных композиционных материалов по данным тензометрии, картирования деформации на поверхности и акустоэмиссии. Контроль. Диагностика. 2011, №11(161), С. 56–62.

В сборниках трудов конференций

1. Panin S.V., **Byakov A.V.**, Grenke V.V., Shakirov I.V. Automated System for Registration, Processing and Analysis of Acoustic Emission Signals Under Deformation and Fracture, Proceedings of Third International Forum on Strategic Technologies Novosibirsk-Tomsk, Russia, June 23-29, 2008. p. 455-459.

2. **Бяков А.В.**, Панин С.В., Гренке В.В., Шакиров И.В. Автоматизированный комплекс для изучения деформационного поведения конструкционных материалов на микро-, мезо- и макроуровнях. // Современные информационные технологии в науке, образовании и практике» Оренбург, 27 ноября, 2008. - с. 67-73.

3. Panin S.V., **Byakov A.V.**, Kuzovlev M.S., Grenke V.V., Shakirov I.V., Ovechkin B.B. «Testing of automatic system for registration, processing and analysis of acoustic emission data by model signals». Proceedings IFOST'2009, 21-23 October, 2009, Ho Chi Ming City, Vietnam, Vol.3, p. 202-206.

4. **Byakov A.V.**, Panin S.V., Grenke V.V. et al. Study of localized strain at micro-, meso- and macrolevels in AA2024 alloy by data of acoustic emission, surface strain mapping and strain gauging. Procedia Engineering (July 2009) Mesomechanics 2009, Edited by A. Korsunsky, D. Dini and G.C. Sih. Vol. 1, I. 1, P. 71-74.

5. Шакиров И.В., Панин С.В., Гренке В.В., **Бяков А.В.** Программа обработки и анализа изображений поверхности нагруженных твердых тел с использованием вейвлет–преобразования. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ №2009615798. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 16.10.2009.

6. Шакиров И.В., Панин С.В., Гренке В.В., **Бяков А.В.** Программа для вейвлет анализа акустических сигналов, сопровождающих/эмитируемых в процессе нагружения деформируемых твердых тел. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ №2009615799. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 16.10.2009.

7. **Byakov A.V.**, Panin S.V., Grenke V.V., Shakirov I.V., Kuzovlev M.S. Analysis of stage pattern of strain localization at various scale levels in AA2024 specimens with notches of different shape at static loading by data of strain gauging, surface strain mapping and acoustic emission. Proceedings of the 12th International Congress on Mesomechanics, Taipei, Taiwan, 21-25 June, 2010. PP.105-108.

8. Panin S.V., **Byakov A.V.**, Shakirov I.V., et al. Diagnostics of Deformation and Fracture Stages on the Basis of Acoustic Emission, Optical Microscopy Strain Gauging // Proceedings of 10th European Conference on Non-Destructive Testing, 7-11 June 2010, Moscow (CD, Paper No. 1.07.15).

9. **Бяков А.В.**, Панин С.В., Шакиров И.В.. Программа регистрации, выделения и анализа сигналов акустической эмиссии. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ №2010610290. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 11.01.2010.

10. Панин С.В., Бурков М.В., **Бяков А.В.**, Любутин П.С., Полтаранин М.А. Многомасштабный метод анализа деформации металлических сплавов и углерод-углеродных композиционных материалов по данным тензометрии, картирования деформации на поверхности и акусто-эмиссии. Ресурс и диагностика материалов и конструкций - 2011, 25-29 апреля, Екатеринбург, Россия, с. 183.

11. Panin S.V., Burkov M.V., **Byakov A.V.**, Lyubutin P.S. 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. Mesomechanics-2011, 13th International Conference, Vicenza, Italy 6-8 July, 2011, p. 44-47.

12. Панин С.В., Бурков М.В., **Бяков А.В.**, Любутин П.С. Применение комбинированного метода исследования локализованной деформации при нагружении образцов из углерод-углеродного композиционного материала с различными концентраторами напряжений. XIX Всероссийская научно-техническая конференция по НК и ТД, Самара, 6 – 8 сентября 2011 г., с. 403-405.