

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-6-53-63>

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ РАННЕЙ ДИАГНОСТИКИ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ АВИАЦИОННОЙ ПАНЕЛИ

© Игорь Евгеньевич Васильев¹, Юрий Григорьевич Матвиенко¹,
Андрей Вячеславович Панков², Алексей Геннадьевич Калинин²

¹ Институт машиноведения им. А. А. Благоднарова РАН, Россия, 119334, Москва, ул. Бардина. д. 4;
e-mail: vie01@rambler.ru

² Центральный аэрогидродинамический институт им. Н. Е. Жуковского, Россия, 140180, Московская обл., г. Жуковский, ул. Жуковского, 1.

*Статья поступила 9 февраля 2018 г. Поступила после доработки 9 февраля 2018 г.
Принята к публикации 15 июня 2018 г.*

Приведены результаты применения разработанной в ИМАШ РАН методики ранней диагностики скрытого повреждения в авиационной панели из композитного материала при стендовых испытаниях на растяжение. Оценены возможности разработанной методики и программного продукта для выявления повреждения на ранней стадии нагружения панели в условиях упругого деформирования материала с применением хрупкого тензопокрывтия, трещины в котором регистрировали синхронно с применением высокоскоростной видеокамеры «Видеоспринт» и акустико-эмиссионной системы A-Line 32D. В ходе эксперимента по выявлению подповерхностного дефекта (надреза среднего стрингера) в авиационной панели протестирована разработанная в ИМАШ концепция выявления повреждений на ранней стадии нагружения в условиях упругого деформирования материала конструкции. При этом тестировали не только методику, но и специально разработанное для кластерного анализа и классификации регистрируемых локационных импульсов программное обеспечение (ПО), а также оборудование и ПО для синхронной записи потоков видеоизображений и массивов акустико-эмиссионных (АЭ) данных. Синхронная регистрация потоков видеоизображений и импульсов АЭ позволила точно контролировать процесс трещинообразования в тензопокрывтии на этапах эксперимента, а структурно-феноменологический подход при классификации регистрируемых массивов данных АЭ — отслеживать основные тренды накопления повреждений на разных структурных уровнях и идентифицировать источники их излучения. Комплексное использование оксидного тензопокрывтия, высокоскоростной видеосъемки, синхронизированной с системой АЭ контроля, дало возможность в процессе мониторинга состояния авиационной панели при уровне нагрузки $P = 90$ кН, составляющей примерно 12 % от предельной, точно диагностировать область подповерхностного дефекта, выявлять распределение наибольших главных деформаций в области трещинообразования хрупкого покрытия, проводить их количественную оценку и идентифицировать основные источники излучения АЭ сигналов.

Ключевые слова: ранняя диагностика; повреждение; хрупкое тензопокрывтие; акустическая эмиссия; высокоскоростная видеосъемка; композитная панель.

APPLICATION OF THE EARLY DAMAGE DIAGNOSTICS TECHNIQUE TO EXAMINATION OF THE AVIATION PANEL

© Igor E. Vasil'ev¹, Yury G. Matvienko¹, Andrei V. Pankov², Alexei G. Kalinin²

¹ Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAS), ul. Bardina 4, Moscow, 119334, Russia; e-mail: vie01@rambler.ru

² Prof. N. E. Zhukovsky Central Aero-hydrodynamic Institute (TSAGI), ul. Zhukovskogo, 1, Zhukovsky, Moscow obl., 140180, Russia.

Received February 9, 2018. Revised February 9, 2018. Accepted June 15, 2018.

The results of using early damage diagnostics technique (developed in the Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN) for detecting the latent damage of an aviation panel made of composite material upon bench tensile tests are presented. We have assessed the capabilities of the developed technique and software regarding damage detection at the early stage of panel loading in conditions of elastic strain of the material using brittle strain-sensitive coating and simultaneous crack detection in the coating with a high-speed video camera "Video-print" and acoustic emission system "A-Line 32D." When revealing a subsurface defect (a notch of the middle stringer) of the aviation panel, the general concept of damage detection at the early stage of loading in conditions of elastic

behavior of the material was also tested in the course of the experiment, as well as the software specially developed for cluster analysis and classification of detected location pulses along with the equipment and software for simultaneous recording of video data flows and arrays of acoustic emission (AE) data. Synchronous recording of video images and AE pulses ensured precise control of the cracking process in the brittle strain-sensitive coating (tensocoating) at all stages of the experiment, whereas the use of structural-phenomenological approach kept track of the main trends in damage accumulation at different structural levels and identify the sources of their origin when classifying recorded AE data arrays. The combined use of oxide tensocoatings and high-speed video recording synchronized with the AE control system, provide the possibility of definite determination of the subsurface defect, reveal the maximum principal strains in the area of crack formation, quantify them and identify the main sources of AE signals upon monitoring the state of the aviation panel under loading $P = 90$ kN, which is about 12% of the critical load.

Keywords: early diagnostics; damage; brittle strain-sensitive (tensosensitive) coating; acoustic emission; high-speed video recording; composite panel.

Введение

Использование тензопокровтий в качестве средства неразрушающего контроля и диагностики на ранней стадии нагружения в условиях упругого деформирования конструкций для выявления скрытых локальных дефектов в структуре материала и оценки степени его деградации в зоне повреждения — новое направление в развитии метода хрупких тензочувствительных покрытий.

По картине распространения трещин в тензопокровтии [1 – 3] можно оперативно и достаточно точно диагностировать не только воздействие конструктивно-технологических особенностей на напряженно-деформированное состояние (НДС) в исследуемых элементах конструкций, но и выявлять скрытые локальные дефекты и повреждения в структуре материала.

Основными способами контроля и регистрации распространения трещин в хрупком тензопокровтии до недавнего времени были визуальное наблюдение и фотосъемка [1 – 3]. Поскольку величина раскрытия трещин в тензопокровтиях составляет примерно 2 – 3 мкм, то для их регистрации используют направленный свет под углом 30 – 60° к исследуемой поверхности. Регистрация картин трещин в хрупких тензочувствительных покрытиях заключается в фрагментном фотографировании и зарисовке на предварительно подготовленные эскизы мест образования трещин в исследуемой конструкции. Визуальное наблюдение за распространением трещин в тензопокровтии в процессе эксперимента часто оказывается технически сложной процедурой, а время, требуемое для зарисовки картин трещин на этапах эксперимента, как правило, превышает длительность самих испытаний. При этом точность воспроизведения картин трещин на эскизах в значительной степени зависит от способностей экспериментатора. Для улучшения видимости образовавшихся в тензопокровтии трещин используют проникающие красители и электростатически заряженные частицы эпоксидных смол [1 – 4].

Однако эти методы применимы лишь на этапе постобработки результатов испытаний.

Таким образом, ограничения применения метода хрупких покрытий обусловлены необходимостью оптико-визуальной регистрации процесса трещинообразования тензопокровтия, сложностью воспроизведения образующихся картин трещин на носителях информации (зарисовка на эскизах, фото- и видеосъемка в направленном свете), а также локальностью размещения тензопокровтий в технологически доступных зонах конструкции, в которых возможна фиксация образования трещин. Указанные факторы в значительной степени ограничивают возможности применения метода при исследовании распределения полей главных напряжений (деформаций), выявлении повреждений и скрытых локальных дефектов в конструкциях. Поэтому возникает необходимость в разработке и применении иных методов и средств для дистанционного мониторинга и автоматизации процесса регистрации трещин в хрупких тензопокровтиях [4 – 8].

Концепция ранней диагностики для выявления повреждений в конструкциях

Проведены исследования и разработана концепция комплексного использования хрупких оксидных тензоиндикаторов, систем высокоскоростной видеосъемки и акустико-эмиссионного контроля для диагностики дефектов в композитных материалах. Характерной особенностью предложенной концепции является то, что получаемая информация о деформировании материала и степени его деградации регистрируется на всех структурных уровнях. Структурно-феноменологический подход, используемый для классификации регистрируемых при акустико-эмиссионной диагностике массивов данных, специально разработанное программное обеспечение (ПО) для выделения сигналов акустической эмиссии (АЭ), возникающих при образовании трещин в хрупком тензопокровтии, синхронизированное с высо-

коскоростной видеосъемкой, позволяют в режиме реального времени на ранних стадиях нагружения в условиях упругого деформирования материала выявлять локальные повреждения и дефекты в исследуемых элементах конструкций.

Разработанная методика и программный продукт для классификации регистрируемых массивов данных базируются на том положении, что сигналы АЭ, порожденные одинаковыми по природе излучения источниками акустической эмиссии, схожие по форме и спектру, с высокой долей вероятности излучаются подобными источниками, и напротив, сигналы, форма и спектр которых существенно отличаются, излучаются различными по природе источниками АЭ.

В основу алгоритма разделения сигналов АЭ положен кластерный подход, позволяющий проводить классификацию экспериментально установленных значений критериальных параметров, характеризующих определенные АЭ свойства регистрируемых импульсов. Сигналы, схожие друг с другом по ряду заранее выбранных признаков, относят к одному и тому же кластеру. При этом объектом кластеризации являются сигналы АЭ, а в качестве меры их схожести используют установленные при тестировании границы критериальных параметров (дескрипторов), в поле которых регистрируемые акустико-эмиссионной системой импульсы и формируют кластеры, свойственные определенным источникам излучения АЭ.

Для классификации и разделения регистрируемых АЭ системой локационных импульсов на кластеры использован алгоритм распознавания сигналов по форме затухающей волны, базирующийся на таких параметрах, как максимальная амплитуда (u_m), количество выбросов (N_n), длительность импульса (t_n). В качестве критериальных параметров, наиболее информативных для разделения сигналов по форме акустической волны, выбраны идентификаторы, характеризующие скорость затухания сигнала (u_m/N_n) и усредненную частоту его осцилляций (N_n/t_n), в поле которых импульсы, совпадающие по форме затухающей волны, формируют свойственные им кластеры.

Как показали проведенные исследования [5 – 10], предложенный критериальный подход позволяет во входном потоке данных выявлять наличие различных источников АЭ. Причем анализ локационных импульсов возможен непосредственно в реальном времени и не требует предварительной фильтрации данных.

Акустико-эмиссионные свойства оксидных тензоиндикаторов

В публикациях [5 – 8] подробно изложены проведенные экспериментальные исследования и основные акустико-эмиссионные свойства хрупких оксидных тензоиндикаторов. Для исследования АЭ свойств оксидных тензоиндикаторов использовали алюминиевую фольгу толщиной 100 мкм, которую наклеивали на поверхность тестовых образцов из инертного к АЭ материала: оргстекла или эпоксидной смолы. Электрохимическое анодирование алюминиевой фольги проводили по отработанным технологическим режимам, позволяющим получать оксидные тензопокрывтия с заданными характеристиками тензочувствительности, в частности, величиной пороговой деформации $\varepsilon_0 = 500 - 1000$ мкм/м.

С применением разработанной программы кластерного анализа для классификации регистрируемых локационных импульсов проведены тестовые испытания многослойной структуры тензоиндикатора в процессе его деформирования и разрушения [5 – 8]. В поле дескрипторов u_m/N_n , N_n/t_n определены кластеры, формируемые сигналами АЭ, возникающими при разрушении хрупкого оксидного слоя, алюминиевой фольги и клеевой прослойки. Анализ кластеров, формируемых на диаграммах дескрипторов импульсами АЭ, возникающими в результате образования трещин в тензопокрывтии, показал, что величина параметра u_m/N_n зависит от уровня порога дискриминации сигналов (u_{th}), толщины оксидной пленки и скорости деформирования подложки [5 – 10].

Для выявления на диаграмме дескрипторов $u_m/N_n - N_n/t_n$ границ кластеризации импульсов АЭ, генерируемых при испытании образцов на консольный изгиб, регистрировали сигналы АЭ, возникающие при образовании трещин в хрупком слое тензопокрывтия, в процессе упругопластического деформирования и разрыва алюминиевой фольги, разрушения клеевого слоя и отслаивания покрытия от подложки. На диаграмме дескрипторов $u_m/N_n - N_n/t_n$, приведенной на рис. 1, выделены кластеры сигналов АЭ, генерируемые различными слоями тензоиндикатора и зарегистрированные при тестовых испытаниях оксидного покрытия с величиной пороговой деформации $\varepsilon_0 = 600$ мкм/м при уровне $u_{th} = 30$ дБ в процессе повышения растягивающей деформации в подложке до момента ее разрушения. Видно, что область кластера 1, образуемого сигналами, регистрируемыми при разрушении хрупкого слоя тензоиндикатора, частично перекрывается кластерами 3 и 4, формируемыми сигналами, возникающими при разрыве алюминиевой фольги, разрушении клеевого слоя и отслаивании

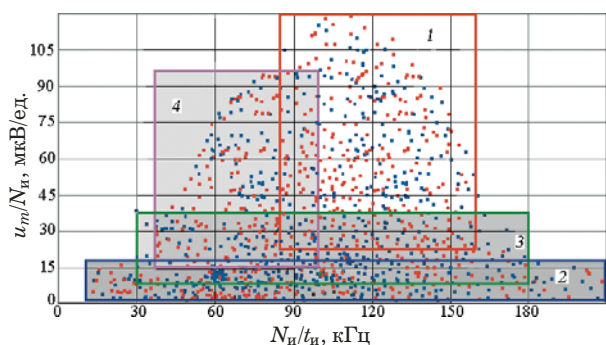


Рис. 1. Кластеры сигналов АЭ, формирующиеся в поле параметров $u_m/N_n - N_n/t_n$ при $u_{th} = 30$ дБ в результате образования трещин в хрупком слое тензоиндикатора с величиной пороговой деформации $\varepsilon_0 = 600$ мкм/м (1), упругопластическом деформировании алюминиевой фольги (2), ее разрыве (3), разрушении клеевого слоя и отслаивании покрытия от подложки (4)

фольги от подложки. Кластер 2, формируемый сигналами, возникающими при упругопластическом деформировании алюминиевой фольги, располагается заметно ниже.

На этапе постобработки сигналы кластера 1 в зонах перекрытия с сигналами кластеров 3 и 4 выделяют на трехмерном графике дескрипторов. При этом в качестве третьего дескриптора может

быть использован параметр времени, нагрузки или деформации. Трещины в хрупком слое оксидной пленки возникают при уровнях деформации $\varepsilon_1 \geq \varepsilon_0 = 500 - 1500$ мкм/м, в то время как разрушение клеевого слоя, отслаивание от подложки и разрыв алюминиевой фольги происходят при значительно более высоких уровнях деформации $\varepsilon_1 = (3 - 30) \cdot 10^3$ мкм/м, когда в хрупком слое тензоиндикатора уже имеет место высокая плотность трещин ($\Psi \geq 30$ ед./см) и процесс образования новых трещин практически прекращается. При таких уровнях деформаций регистрируемая активность АЭ событий генерирована процессами разрушения клеевого слоя, отслаивания покрытия, упругопластического деформирования и разрыва алюминиевой фольги.

Объект исследования и средства диагностики

На рис. 2, а приведен эскиз исследуемой конструкции, представляющей собой панель из ПКМ с тремя стрингерами, изготовленную из многослойного углепластика по технологии инфузионной пропитки преформ, выложенных автоматизированным способом укладки. Для создания подповерхностного дефекта в центре панели

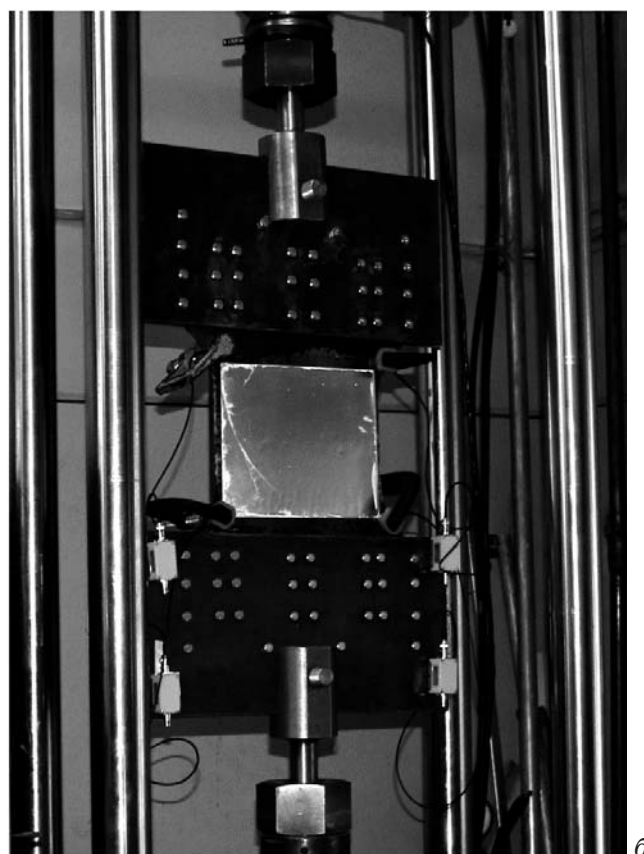
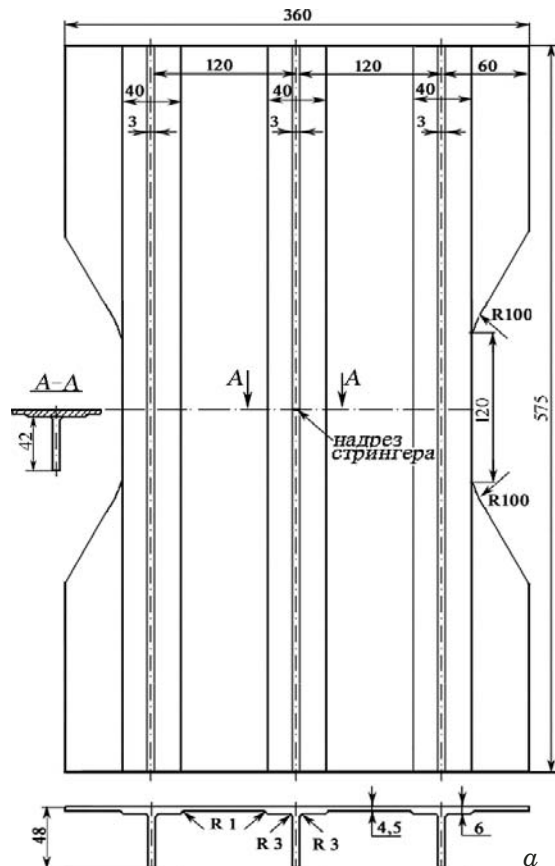


Рис. 2. Конструкция исследуемой панели с тремя стрингерами (а) и ее вид после крепления оправки с наклеенным оксидным тензопокровием, установленными преобразователями и предусилителями АЭ в захватах нагружающей установки МТС (б)

выполняли надрез среднего стрингера дисковой фрезой толщиной 1 мм на глубину 42 мм. При испытаниях панели на растяжение средства неразрушающего контроля — оксидный тензоиндикатор и преобразователи АЭ — устанавливали на лицевой поверхности панели, как показано на рис. 2, б.

Для установки панели в захватах разрывной машины изготавливали специальную оправку из стали 20, прижимные накладки которой стягивали 28 болтовыми соединениями. После предварительной затяжки накладок оправки панель посредством силовых штифтов (из стали 40Х) диаметром 40 мм устанавливали в проушины верхней и нижней траверсы нагружающего стенда. Испытания панели проводили на электрогидравлической установке MTS, позволяющей создавать растягивающее усилие до 500 кН как в ручном, так и автоматическом режиме нагружения с заданной скоростью перемещения активной траверсы.

Для изготовления оксидного тензоиндикатора использовали алюминиевую фольгу марки А7 толщиной 100 мкм. Основой для изготовления анода послужил лист текстолита размером $4 \times 450 \times 250$ мм, на котором с применением химически стойкого лака и прозрачного скотча закрепляли оксидируемую фольгу. Для получения на поверхности алюминиевой фольги хрупкого слоя оксидной пленки толщиной порядка 30 мкм с величиной пороговой деформации порядка 500 – 600 мкм/м анодирование проводили в 15 %-ном водном растворе серной кислоты в течение 40 мин при плотности тока 4 А/дм² и температуре электролита 10 – 15 °С. После оксидирования для удаления электролита анод промывали в проточной воде и помещали в сушильный шкаф. Для предотвращения образования трещин в хрупком слое оксидной пленки оксидированную фольгу разрезали вдоль границ поверхности, на которую перед оксидированием наносили прозрачный скотч. Помимо оксидированной фольги, наклеиваемой на поверхность исследуемой панели, вырезали полосы размерами 150×20 мм для определения характеристик тензочувствительности хрупкого тензопокртия на тестовых образцах. Оксидированную фольгу наклеивали на поверхности исследуемой панели и тестовых образцов с применением эпоксидного клея холодного отверждения марки ЭДП.

Характеристики тензочувствительности тестировали на плоских балках размером $250 \times 23 \times 6$ мм, вырезанных из ПКМ, аналогичного исследуемой панели. Тестовые образцы консолюно закрепляли и нагружали изгибающей нагрузкой. Результаты тестовых испытаний характеристик тензочувствительности оксидного тензопо-

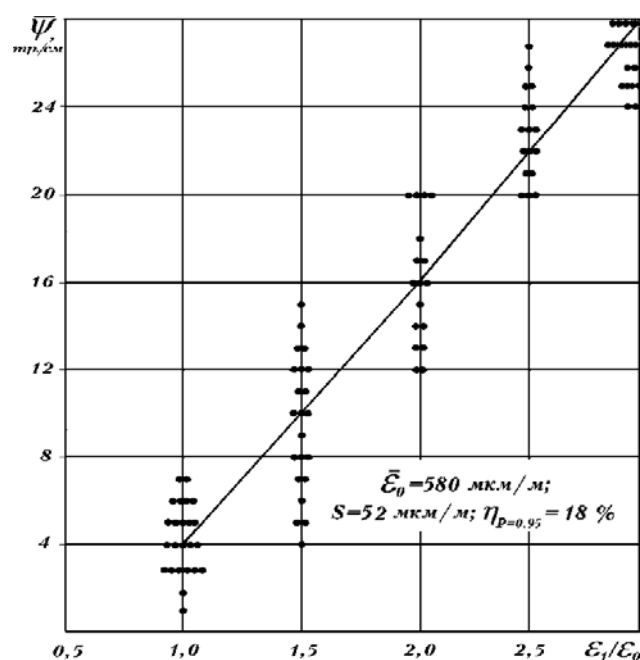


Рис. 3. Изменения численности трещин ($\bar{\Psi}$) в оксидном тензоиндикаторе в зависимости от отношения уровня деформации ε_1 в подложке к ее пороговому значению ε_0

крытия на плоских балках из ПКМ представлены на рис. 3.

Экспериментальные исследования акустических свойств композитных панелей и образцов проводили на основании специально разработанных методик с использованием пьезоэлектрических преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ) R15-а, которые подключали к многопараметрической системе сбора и обработки АЭ информации A-Line 32D. Исследуемую панель крепили в захватах стенда MTS, протягивали болтовые соединения оправки и устанавливали преобразователи АЭ. Рабочую поверхность преобразователей R15-а смазывали техническим вазелином и с помощью стальных трубочин ПАЭ крепили к поверхности панели. Для проведения планарной локализации источников сигналов преобразователи АЭ размещали в центральной зоне панели по углам оксидного тензоиндикатора симметрично относительно центральных осей. Расстояние между ближайшими преобразователями по ширине панели составляло 280 мм, а по высоте — 230 мм.

После установки ПАЭ и предусилителей сигналов ПАЭФ-014 с применением имитатора АЭ импульсов Су-Нильсена определяли скорость распространения ультразвуковых волн в исследуемой панели и коэффициент затухания. На основании выполненных замеров акустических шумов порог дискриминации сигналов АЭ был установлен на уровне 30 дБ.

Для видеорегистрации картин трещин в хрупком тензоиндикаторе при нагружении пане-

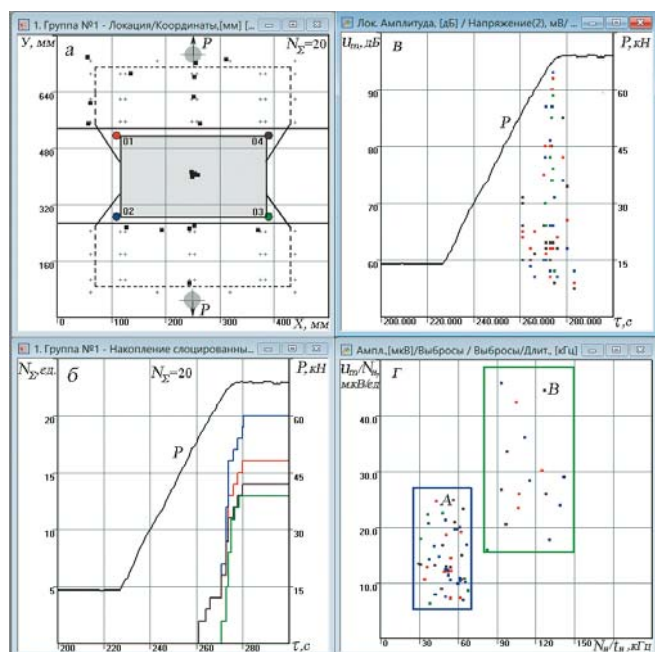


Рис. 4. Графики координатной локации источников АЭ событий (а), накопления локационных импульсов (б), максимальной амплитуды локационных импульсов (в) и диаграммы дескрипторов (г), полученные при АЭ контроле панели на втором этапе эксперимента при повышении уровня нагрузки до $P = 70$ кН

ли на стенде MTS использовали высокоскоростную камеру «Видеоспринт», работа которой была синхронизирована с акустико-эмиссионной системой A-Line 32D, в результате чего процесс съемки происходил только в моменты регистрации событий АЭ в зоне тензопокрывтия. В ходе эксперимента видеосъемку проводили со скоростью 200 – 500 кадров в секунду, что позволило с периодичностью 2 – 5 мс регистрировать кадры процесса распространения трещин в оксидном тензопокрывтии.

Испытания панели на стенде MTS

Испытания исследуемой панели проводили в пять этапов нагружения с повышением уровня максимальной нагрузки примерно в 1,5 – 2 раза на каждом последующем этапе. Перед нагружением панели выполняли протяжку болтовых соединений оправки. При повышении растягивающего усилия до заданного уровня панель выдерживали в нагруженном состоянии не менее 30 с до прекращения активной регистрации сигналов АЭ, после чего разгружали.

На первом этапе растягивающую нагрузку повышали до 30 кН и выдерживали на этом уровне 400 с. В течение этого времени наблюдалась активная регистрация сигналов АЭ. Образования трещин и локации источников АЭ событий в зоне расположения оксидного тензоиндикатора зарегистрировано не было. Локацию источников

АЭ событий наблюдали вне антенной решетки: в местах расположения болтовых соединений, связывающих панель с накладками оправки, и силовых штифтов, передающих усилие от захватов верхней и нижней траверсы стенда на исследуемую конструкцию.

Всего было зарегистрировано 12 источников излучения АЭ. Локационные импульсы были генерированы процессами трения в результате проскальзывания панели в зазорах болтовых соединений оправки при повышении нагрузки и смятии композитного материала в местах контакта с поверхностью болтов. Максимальная амплитуда таких импульсов $u_m = 80$ дБ, а их длительность $t_i = 5000$ мкс. Параметр, характеризующий скорость затухания акустической волны для импульсов трения, $u_m/N_i = 5 - 25$ мкВ/ед. при $u_{th} = 30$ дБ, а усредненная частота осцилляций $N_i/t_i = 30 - 70$ кГц.

На втором этапе испытания панели максимальную нагрузку повысили до 70 кН и выдержали на этом уровне в течение 30 с. Образования трещин в оксидном тензоиндикаторе на этом этапе также не зафиксировано. На рис. 4 приведены результаты акустико-эмиссионного контроля состояния панели на этом этапе эксперимента. Как следует из рис. 4, а и б, зарегистрировано $N_\Sigma = 20$ ед. источников сигналов: пять источников АЭ — в области тензопокрывтия, в зоне надреза центрального стрингера панели; 15 источников АЭ — вне зоны антенной решетки ПАЭ, в местах крепления накладок оправки и силовых штифтов. АЭ наблюдали при повышении уровня нагрузки от 50 до 70 кН. При этом максимальная амплитуда регистрируемых импульсов $u_m \geq 90$ дБ, а их длительность $t_i = 6000$ мкс. На графике дескрипторов (см. рис. 4, г) образовались два явно выраженных кластера: кластер А с параметрами $u_m/N_i = 5 - 25$ мкВ/ед., $N_i/t_i = 10 - 70$ кГц и кластер В с параметрами $u_m/N_i = 15 - 50$ мкВ/ед., $N_i/t_i = 75 - 150$ кГц. Кластер А формировали импульсы трения, возникающие в результате проскальзывания панели в зазорах болтовых соединений оправки при повышении нагрузки и смятии композитного материала в месте контакта с поверхностью болтов. Импульсы кластера В, зарегистрированные в зоне надреза центрального стрингера, как следует из проведенных исследований [9 – 10], характерны для сигналов АЭ, возникающих при разрушении хрупкой структуры матрицы в слоях пакета ПКМ. Причем нижнюю часть кластера В с уровнем параметра $u_m/N_i = 15 - 30$ мкВ/ед. при $u_{th} = 30$ дБ сформировали импульсы АЭ, генерируемые при отслаивании связующего от армирующих волокон, зарождении и развитии трещин в хрупкой структуре матрицы ПКМ, а верхнюю часть с

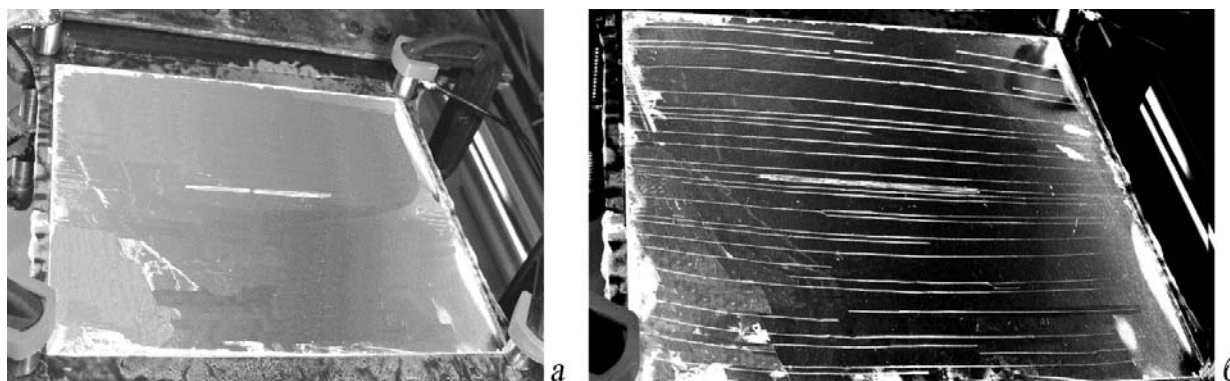


Рис. 5. Первые трещины в оксидном тензоиндикаторе, зарегистрированные камерой «Видеоспринт» при повышении уровня нагрузки до 90 кН (а) и картина трещин в тензопокрывтии, зафиксированная видеокамерой EOS 60D при максимальной нагрузке $P = 130$ кН на третьем этапе испытания (б)

уровнем параметра $u_m/N_i \geq 30$ мкВ/ед. — импульсы, возникающие при разрыве углеволокна.

На третьем этапе испытаний нагрузку повысили до 130 кН, выдержали на этом уровне в течение 30 с, после чего панель разгрузили. Первые трещины в хрупком покрытии (рис. 5, а) зафиксировали с применением высокоскоростной видеокамеры в момент регистрации АЭ событий в зоне тензоиндикатора при повышении уровня нагрузки до 90 кН.

На рис. 5, б представлена картина трещин, образовавшаяся в хрупком тензоиндикаторе при повышении нагрузки до максимального на этом этапе уровня $P = 130$ кН, зафиксированная с применением видеокамеры EOS 60D фирмы Canon. В центре тензоиндикатора в месте надреза среднего стрингера образовался узкий пучок трещин. В остальной части тензоиндикатора трещины были распределены более равномерно. Их плотность в среднем составляла 2 – 4 ед./см, что согласно зависимости $\Psi = f(\varepsilon_1/\varepsilon_0)$, приведенной на рис. 3, имеет место, когда уровень наибольших деформаций в подложке достигает порогового уровня $\varepsilon_1 = \varepsilon_0 = 600$ мкм/м. В области надреза стрингера расстояние между соседними трещинами составляло порядка 1 мм, т.е. можно принять условную плотность трещин $\Psi = 10$ ед./см, при которой уровень максимальных деформаций в подложке в соответствии с зависимостью $\Psi = f(\varepsilon_1/\varepsilon_0)$ достигает $\varepsilon_1 = 1,5\varepsilon_0 = 900$ мкм/м.

На рис. 6 приведены результаты акустико-эмиссионного контроля состояния панели на третьем этапе испытания панели.

Как следует из рис. 6, а, основной массив источников АЭ сосредоточен в области тензоиндикатора, где локационные импульсы генерированы процессами образования трещин в тензоиндикаторе и разрушением материала панели в месте надреза среднего стрингера. В зоне надреза регистрировали наибольшую плотность сигналов АЭ, в границах которых количество источни-

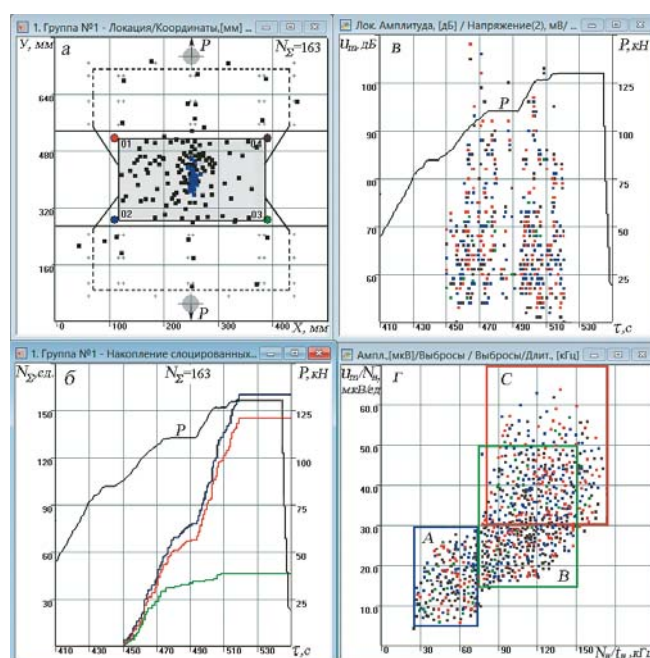


Рис. 6. Графики координатной локации источников АЭ событий (а), накопления локационных импульсов (б), максимальной амплитуды локационных импульсов (в) и диаграмма дескрипторов (г), полученные при АЭ контроле панели на третьем этапе испытаний при повышении уровня максимальной нагрузки до $P = 130$ кН

ков могло достигать $N = 6 - 10$ единиц. На остальной поверхности тензопокрывтия источники АЭ распределялись более равномерно. Всего было зарегистрировано $N_\Sigma = 163$ источника АЭ, из которых только 22 — вне области тензоиндикатора. Локационные импульсы АЭ, как видно из рис. 6, б, в, регистрировали в процессе роста нагрузки от 90 до 130 кН. Максимальная амплитуда локационных импульсов $u_m = 100 - 110$ дБ, а их длительность — 5000 – 6000 мкс. При этом параметр u_m/N_i (см. рис. 6, г) значительного массива импульсов находился в интервале значений 30 – 70 мкВ/ед., что характерно для сигналов АЭ, возникающих при образовании трещин в хруп-

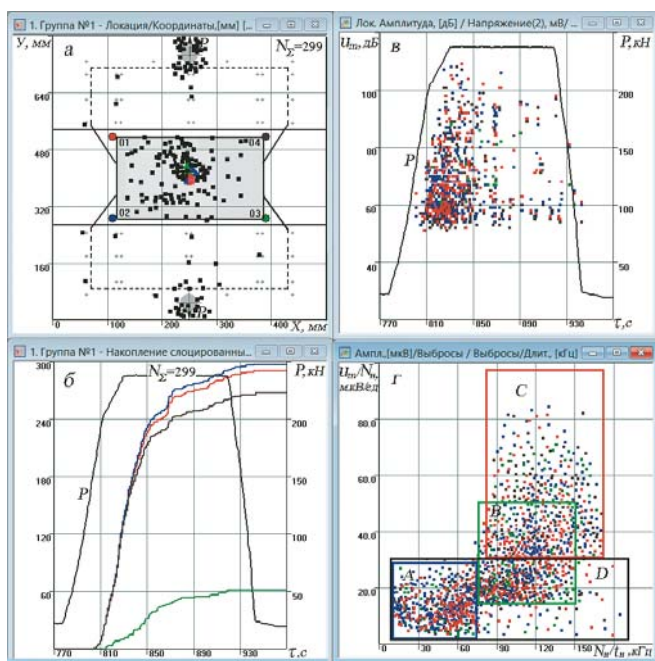


Рис. 7. Графики координатной локации источников АЭ событий (а), накопления локационных импульсов (б), максимальной амплитуды локационных импульсов (в) и диаграмма дескрипторов (г), полученные на четвертом этапе эксперимента при повышении нагрузки до $P = 240$ кН

ком слое тензоиндикатора с величиной пороговой деформации $\varepsilon_0 = 600$ мкм/м при уровне порога дискриминации $u_{th} = 30$ дБ [5 – 8].

На графике дескрипторов (см. рис. 6, г) образовались два явно выраженных кластера: левый кластер А с параметрами $u_m/N_{ii} = 5 - 25$ мкВ/ед., $N_{ii}/t_{ii} = 10 - 70$ кГц, формируемый импульсами АЭ, возникающими в результате трения и смятия ПКМ в болтовых соединениях оправки, и правый кластер с параметрами $u_m/N_{ii} = 15 - 65$ мкВ/ед., $N_{ii}/t_{ii} = 75 - 170$ кГц. Для выделения в последнем импульсов АЭ, вызванных разрушением структуры ПКМ в месте надреза центрального стрингера и генерируемых образованием трещин в тензопокрывтии, использовали результаты, полученные на предыдущем этапе испытаний панели (см. рис. 4, г), а также данные диаграммы дескрипторов на рис. 1 для границ кластера 1, формируемого сигналами, возникающими при образовании трещин в хрупком слое тензоиндикатора с величиной пороговой деформации $\varepsilon_0 = 600$ мкм/м при уровне порога дискриминации $u_{th} = 30$ дБ.

Как следует из рис. 6, г, кластер В с границами параметров $u_m/N_{ii} = 15 - 50$ мкВ/ед., $N_{ii}/t_{ii} = 75 - 150$ кГц, формируемый сигналами, генерируемыми при разрушении структуры ПКМ, практически наполовину перекрывает кластер С, образуемый импульсами, возникающими в результате разрушения хрупкого слоя тензопок-

крытия, с границами параметров $u_m/N_{ii} = 30 - 70$ мкВ/ед., $N_{ii}/t_{ii} = 80 - 170$ кГц. В зоне перекрытия кластеров В и С разделить сигналы, возникающие при разрыве углеволокна в структуре пакета ПКМ и образовании трещин в хрупком слое тензопокрывтия, в режиме реального времени практически невозможно. Решение этой задачи требует дополнительных исследований и новых подходов, основанных на изучении спектральных характеристик сигналов, что возможно только на этапе постобработки результатов АЭ диагностики.

На четвертом этапе испытаний нагрузку повысили до 240 кН. Наиболее интенсивное образование трещин в тензопокрывтии происходило в период ее повышения от 150 до 240 кН. При выходе на режим постоянной нагрузки $P = 240$ МПа новые трещины фиксировали лишь в первые секунды выдержки, хотя активность сигналов оставалась высокой в течение всей выдержки и начала снижаться лишь при разгрузке панели. Важно отметить, что при повышении нагрузки от 150 до 240 кН рост численности трещин в области надреза стрингера был незначительным, а в сопряженных с концентратором зонах, отстоящих на расстоянии 3 – 5 мм от места надреза, трещины в тензопокрывтии вообще не наблюдались. Эти области панели оказались разгруженными, а в зонах, отстоящих от концентратора на 5 – 10 мм, трещины в тензоиндикаторе изменяли свою направленность и огибали место локального дефекта.

Результаты акустико-эмиссионного контроля состояния панели, зарегистрированные на четвертом этапе испытаний, приведены на рис. 7. Координаты источников АЭ, локация которых происходила как в области расположения тензоиндикатора, так и вне его, показаны на рис. 7, а. Особенно высокая концентрация источников АЭ имела место в зоне надреза среднего стрингера. Поскольку существенного повышения плотности трещин в тензопокрывтии на четвертом этапе испытаний панели в этой зоне не наблюдалось, то, вероятно, основной массив регистрируемых АЭ сигналов в зоне концентратора был вызван процессом разрушения структуры матрицы в слоях пакета ПКМ.

Вне тензоиндикатора локация источников АЭ происходила в области силовых штифтов стальных накладок, соединяющих оправку с захватами испытательного стенда. Как следует из графика накопления локационных импульсов (см. рис. 7, б), на четвертом этапе испытаний панели зарегистрировано $N_{\Sigma} = 299$ источников АЭ, локация которых происходила при повышении нагрузки свыше 150 кН. При этом максимальная амплитуда высокочастотных импульсов

$u_m = 100 - 110$ дБ, их длительность превышала $t_{\text{и}} = 6000$ мкс. Величина параметра $u_m/N_{\text{и}}$ (см. рис. 7, з) составляла $60 - 85$ мкВ/ед., что свойственно импульсам АЭ, возникающим при образовании трещин в хрупком слое тензоиндикатора при уровне $u_{\text{th}} = 30$ дБ [5 – 8]. Основной массив локационных импульсов, регистрируемых в режиме выдержки при $P = 240$ кН, имел уровень параметра $u_m/N_{\text{и}}$, меньший 30 мкВ/ед., что характерно для сигналов, возникающих при упруго-пластическом деформировании металлов [9].

На диаграмме дескрипторов (см. рис. 7, з) можно выделить четыре основных кластера. В дополнение к кластерам, рассмотренным на предыдущем этапе испытания, сформировался кластер *D* с параметрами $u_m/N_{\text{и}} = 5 - 30$ мкВ/ед., $N_{\text{и}}/t_{\text{и}} = 10 - 190$ кГц, который образовали импульсы, возникающие в процессе упруго-пластического деформирования стальных накладок в области проушин оправки для силовых штифтов, передающих усилие на панель.

На пятом этапе испытаний панели при повышении нагрузки свыше 310 кН в стальных накладках оправки в области силовых штифтов возникли зоны пластического деформирования, в которых при 350 кН течение материала проходило уже без роста прилагаемой нагрузки. После 10-секундной выдержки панель разгружали. При повторном повышении нагрузки до $P = 350$ кН произошел обрыв оправки в захвате верхней траверсы.

В тензоиндикаторе на этом этапе регистрировали достаточно равномерную плотность трещин, составляющую в среднем $\Psi = 24 - 28$ ед./см. В соответствии с графической зависимостью $\Psi = f(\varepsilon_1/\varepsilon_0)$, приведенной на рис. 3, средний уровень наибольших главных деформаций в месте установки тензоиндикатора мог достигать $\varepsilon_1 = 3,0\varepsilon_0 = 1800$ мкм/м. В центральной части тензоиндикатора — в месте надреза стрингера — плотность трещин на пятом этапе испытания панели практически не менялась в процессе нагружения. Это обусловлено тем, что в результате больших локальных деформаций в зоне дефекта при повышении нагрузки свыше 240 кН произошло разрушение клеевого слоя и отслаивание тензоиндикатора от подложки. Причем зона отслаивания по мере роста нагрузки заметно расширялась и при $P = 350$ кН составляла уже около $25 - 30$ мм.

Результаты акустико-эмиссионного контроля состояния панели, зарегистрированные на пятом этапе испытаний, приведены на рис. 8. Координаты источников АЭ событий, локация основного массива которых наблюдалась в центральной зоне тензоиндикатора (в месте надреза стрингера), а также в области силовых штифтов, показаны на рис. 8, а. На пятом этапе испытаний пане-

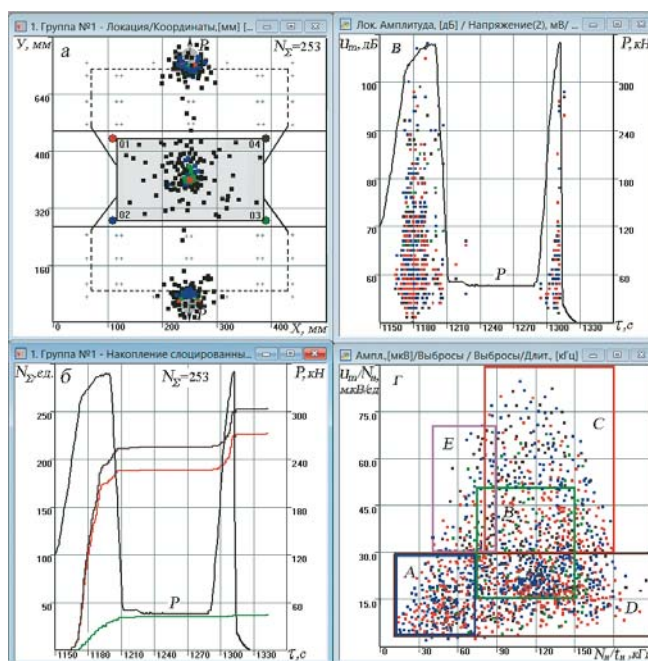


Рис. 8. Графики координатной локации источников АЭ событий (а), накопления локационных импульсов (б), максимальной амплитуды локационных импульсов (в) и диаграмма дескрипторов (г), полученные при АЭ контроле панели на пятом этапе эксперимента при повышении нагрузки до $P = 350$ кН

ли всего было зарегистрировано 253 источника АЭ событий (см. рис. 8, б).

При первом нагружении панели заметную активность АЭ регистрировали в течение всего периода повышения нагрузки — от 240 до 350 кН, при повторном нагружении — наблюдали только в момент разрушения стальных накладок верхней оправки и при сбросе нагрузки. Локационные импульсы АЭ, фиксируемые на пятом этапе испытания панели и вызванные пластическим деформированием и разрушением стальных накладок оправки, имели уровень максимальной амплитуды $u_m = 50 - 90$ дБ, длительность $t_{\text{и}} = 10 - 25$ мс и величину параметра $u_m/N_{\text{и}}$, не превышающую 30 мкВ/ед.

На диаграмме дескрипторов г можно выделить пять основных кластеров сигналов АЭ, сформировавшихся на заключительном этапе испытания панели. Помимо кластеров, регистрируемых на предыдущих этапах испытания, появился кластер *E* с параметрами $u_m/N_{\text{и}} = 30 - 70$ мкВ/ед., $N_{\text{и}}/t_{\text{и}} = 40 - 90$ кГц. Его образовали сигналы АЭ, возникающие при разрушении клеевого слоя, отслаивании оксидированной фольги и ее выщучивании при сбросе нагрузки. Сигналы с аналогичными параметрами регистрировали в тестовых испытаниях тензоиндикаторов на отрыв (см. рис. 1). Импульсы АЭ в период снятия нагрузки (см. рис. 8, в) характерны для зон отслоившегося тензопокрывтия, когда усадоч-

Границы кластеров, формируемые локационными импульсами на этапах испытания композитной панели

Параметры	A	B	C	D	E
$u_m/N_{и}$, мкВ/ед.	5 – 25	15 – 50	30 – 90	5 – 30	30 – 70
$N_{и}/t_{и}$, кГц	10 – 70	75 – 150	80 – 170	10 – 210	40 – 90

ные деформации при сбросе нагрузки вызывают выпучивание деформированной фольги в месте локального отслаивания тензоиндикатора от подложки.

Параметры основных кластеров сигналов, регистрируемых на этапе испытания панели, приведены в таблице.

В ходе проведенных исследований по выявлению подповерхностного дефекта — надреза среднего стрингера в авиационной панели при ее стендовых испытаниях на растяжение — протестирована разработанная в ИМАШ методика выявления повреждений на ранней стадии нагружения в условиях упругого деформирования материала конструкции, основанная на использовании оксидного тензопокрывтия. Для регистрации трещин в хрупком слое этого покрытия применяли высокоскоростную видеосъемку, синхронизированную с АЭ системой диагностики. Тестировали не только методику, но и специально разработанное для кластерного анализа и классификации регистрируемых локационных импульсов программное обеспечение, а также оборудование и ПО для синхронной записи потоков видеоизображений и массивов АЭ данных.

Приведем основные результаты, свидетельствующие о научной новизне выполненной работы.

1. Комплексное использование хрупких тензоиндикаторов и системы АЭ контроля, синхронизированной с высокоскоростной видеосъемкой, дает возможность в ходе мониторинга в режиме реального времени решать следующие задачи: выявлять в процессе раннего нагружения конструкции в условиях упругого деформирования материала скрытые дефекты и повреждения, проводить оценку максимальных деформаций в зонах их локации и определять степень опасности развивающихся повреждений.

2. Синхронная регистрация потоков видеоизображений и акустико-эмиссионных импульсов АЭ позволяет точно контролировать процесс трещинообразования в тензопокрывтии на этапах эксперимента, а структурно-феноменологический подход при классификации регистрируемых массивов данных АЭ — отслеживать в режиме реального времени на ранней стадии деформирования материала основные повреждения на разных структурных уровнях и идентифицировать источники их излучения. Разработанная программа разделения сигналов АЭ в поле дескрипторов $u_m/N_{и}$, $N_{и}/t_{и}$ показала свою эффектив-

ность как в эксперименте с авиационной панелью, так и при тестовых испытаниях композитных образцов на растяжение, сжатие, изгиб, сдвиг [5 – 10].

3. В процессе АЭ мониторинга на этапах нагружения исследуемой панели в поле параметров $u_m/N_{и}$, $N_{и}/t_{и}$ формировались кластеры сигналов АЭ, генерируемые процессами трения, деградацией многослойного пакета ПКМ в зоне надреза стрингера, трещинообразованием оксидного тензопокрывтия, разрушением клеевого слоя и локальным отслаиванием оксидированной фольги от подложки, а также упругопластическим деформированием и разрушением стальных накладок оправки в области проушин силовых штифтов. При этом оценивали НДС панели, выявляли потенциально опасные дефекты, следили за их развитием, прогнозировали уровень разрушающей нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Handbook on experimental mechanics / Edited by. A. S. Kobayashi. — Prentice-Hall: Society for Experimental Mechanics, Inc., 1987. — 1002 p.
2. Напряженно-деформированные состояния ЖРД / Под ред. Н. А. Махутова, В. С. Рачука. — М.: Наука, 2013. — 646 с.
3. Махутов Н. А., Ушаков Б. Н., Васильев И. Е. Применение хрупких тензочувствительных покрытий для оценки прочности и выявления дефектов в сварных швах трубопроводов / Вестник машиностроения. 2011. № 2. С. 44 – 48.
4. Махутов Н. А., Васильев И. Е., Богуславский А. А., Васильев А. И. Автоматизация процесса регистрации трещин в хрупких тензочувствительных покрытиях / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2010. Т. 76. № 11. С. 45 – 50.
5. Махутов Н. А., Шемякин В. В., Ушаков Б. Н., Петерсен Т. Б., Васильев И. Е. Применение акустической эмиссии для контроля за процессом образования трещин в хрупких оксидных тензоиндикаторах / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2011. Т. 77. № 6. С. 41 – 44.
6. Махутов Н. А., Фомин А. В., Иванов В. И., Пермяков В. Н., Васильев И. Е. Комплексная диагностика предельных состояний и раннего предупреждения аварийных состояний конструкций / Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 2. С. 46 – 51.
7. Матвиенко Ю. Г., Васильев И. Е., Иванов В. И., Елизаров С. В. Акустико-эмиссионные свойства оксидных тензоиндикаторов и распознавание сигналов при образовании трещин в хрупком слое покрытия / Дефектоскопия. 2015. № 1. С. 48 – 60.
8. Матвиенко Ю. Г., Васильев И. Е., Панков А. В., Трусевич М. А. Ранняя диагностика зон повреждения и вероятного разрушения композиционных материалов с использованием хрупких тензоиндикаторов и акустической эмиссии / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. № 1. С. 45 – 57.

9. Пат. 2569078 РФ. Способ распознавания источников сигналов акустической эмиссии, возникающих при деградации материала, образовании трещин и разрушении конструкции / Васильев И. Е., Матвиенко Ю. Г., Иванов В. И., Елизаров С. В.; заявитель и патентообладатель Институт машиноведения им. А. А. Благодного РАН. — № 2014125453/28; заявл. 24.06.14; опубл. 20.11.2015. Бюл. № 32.
10. **Матвиенко Ю. Г., Васильев И. Е., Иванов В. И., Елизаров С. В.** Акустико-эмиссионная диагностика процесса разрушения структуры композита при растягивающих, сжимающих и циклических нагрузках / Дефектоскопия. 2016. № 8. С. 30 – 45.

REFERENCES

1. Handbook on experimental mechanics / Edited by. A. S. Kobayashi. — Prentice-Hall: Society for Experimental Mechanics, Inc., 1987. — 1002 p.
2. Stressed-Strained States of Liquid Rocket Engines / N. A. Makhutov, V. S. Rachuk (Eds.). — Moscow: Nauka, 2013. — 646 p. [in Russian].
3. **Makhutov N. A., Ushakov B. N., Vasil'ev I. E.** Strength Assessment and Defect Detection in Welded Pipeline Seams by Means of Brittle Tensosensitive Coatings / J. Russian Engineering Research. 2011. Vol. 31. N 2. P. 123 – 127.
4. **Makhutov N. A., Vasil'ev I. E., Boguslavskii A. A., Vasil'ev A. I.** Automation of Crack Recording in Brittle Tensosensitive Coatings / J. Inorg. Mater. 2011. Vol. 47. N 15. P. 1707 – 1712.
5. **Makhutov N. A., Shemyakin V. V., Ushakov B. N., Petersen T. B., Vasil'ev I. E.** Use of acoustic emission for monitoring the cracking process in brittle oxide pressure-sensitive indicators / Zav. Lab. Diagn. Mater. 2011. Vol. 77. N 6. P. 41 – 44 [in Russian].
6. **Makhutov N. A., Fomin A. V., Ivanov V. I., Permyakov V. N., Vasil'ev I. E.** Complex diagnostics of limiting states and early prevention of emergency states of structures / Probl. Mashinostr. Nadezhn. Mashin. 2013. N 2. P. 46 – 51 [in Russian].
7. **Matvienko Yu. G., Vasil'ev I. E., Ivanov V. I., Elizarov S. V.** The acoustic-emission properties of oxide tensosensitive indicators and signal recognition during the formation of cracks in a brittle coating layer / Nondestructive Testing. 2015. Vol. 51. N 1. P. 39 – 49.
8. **Matvienko Yu. G., Vasil'ev I. E., Pankov A. V., and Trusevich M. A.** Early Diagnostics of Damage and Fracture Zones in Composite Materials Using Brittle Strain Gauges and Acoustic Emission / J. Inorg. Mater. 2017. Vol. 53. N 15. P. 1484 – 1495.
9. RF Pat. 2569078. Method of recognition of the sources of acoustic emission signals arising during the degradation of the material, formation cracks and destroying the structure / Vasil'ev I. E., Matvienko Yu. G., Ivanov V. I., Elizarov S. V. — Publ. 20.11.2015. Byull. N 32 [in Russian].
10. **Matvienko Yu. G., Vasil'ev I. E., Ivanov V. I., and Elizarov S. V.** Acoustic-emission evaluation of the process of destruction of a composite material under tensile, compression, and cyclic loads / J. Nondestructive Testing. 2016. Vol. 52. N 8. P. 443 – 456.