УДК 620.179.16:543.143

АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ПРОЦЕССА ПОВРЕЖДЕНИЯ ОПОРНОЙ СТОЙКИ ПЛАНЕРА В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Ю.Г. Матвиенко[1], И.Е. Васильев[1,*], Д.В. Чернов[1], В.А. Панков[2]

[1]*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Россия 101990 Москва, Малый Харитоньевский пер., 4*
[2]*Центральный аэрогидродинамический институт им. Н. Е. Жуковского (ЦАГИ),*
Россия 140180 г. Жуковский Московской обл., ул. Жуковского, 1
*E-mail: *vie01@rambler.ru*

Поступила в редакцию 03.04.2019; после доработки 14.05.2019
Принята к публикации 24.05.2019

Структурно-феноменологический подход, применяемый для разделения и классификации сигналов акустической эмиссии на энергетические кластеры, совместно с параметрами частоты регистрации и весового содержания локационных импульсов в кластерах, позволяет при мониторинге в режиме реального времени отслеживать основные тренды накопления повреждений на разных структурных уровнях и отделять сигналы, генерируемые при разрушении конструкционного материала, от сопутствующих механических помех и электромагнитных шумов. Приведен пример применения новых критериальных параметров для определения момента отслаивания сбегов стрингеров от полок опорной стойки планера МС-21 в условиях проведения усталостных испытаний при симметричном цикле нагружения. С применением новых критериальных параметров, разработанных методик кластерного анализа, используемых в том числе для разделения локационных импульсов в поле спектральных характеристик, установлена взаимосвязь между процессом разрушения когезионных и адгезионных связей клеевого слоя на границе скрепления сбегов стрингеров с полками опорной стойки, и генерируемыми при этом акустическими сигналами их энергией, формой и спектром.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, локационные импульсы, весовые параметры, частотные характеристики, структура материала, усталостное разрушение.

DOI: 10.1134/S0130308219080037

ВВЕДЕНИЕ

В Институте машиноведения РАН на протяжении ряда лет с применением метода акустической эмиссии (АЭ) проводились исследования по изучению возможности количественной оценки процесса накопления повреждений, определению остаточной прочности и степени деградации свойств конструкционных материалов, в том числе алюминиевых сплавов и композитов, в условиях воздействия различного вида статических и циклических нагрузок. Для проведения такой оценки был использован структурно-феноменологический подход, позволяющий установить перекрестные связи между процессом накопления повреждений и разрушения конструкционного материала, и генерируемыми при этом акустическими сигналами: их энергией, формой и спектром [1—6].

Для выбора универсальных критериальных параметров в качестве объектов исследования использовались не только конструкционно-подобные образцы (КПО) авиационных панелей [1, 2], но и физические модели: хрупкие оксидные тензоиндикаторы, наклеиваемые на поверхность различных конструкционных материалов, имитирующие структуру разрушения сэндвич-панелей и композитов, а также насыпной конус стеклогранулята [3], при формировании которого моделировался процесс усталостного накопления повреждений. На этих физических моделях и образцах, позволяющих создавать широкую вариабельность условий испытаний, видов прилагаемых нагрузок, механизмов разрушения структуры материала, проводилось тестирование и отбор наиболее информативных критериальных параметров, отражающих основные тренды и источники накопления повреждений на микро-, мезо- и макромасштабном уровнях, дающих возможность проводить оценку степени деградации материала и прогнозировать его остаточную прочность, выявлять источники событий АЭ, а также формы и спектры свойственных им локационных импульсов [4—6].

Как следует из публикаций различных исследовательских групп [7—17], применяемые методики кластерного анализа регистрируемых при АЭ-мониторинге импульсов, в том числе нейронных сетей, в сочетании со спектральным и вейвлет анализами их спектров, синхронной видеосъемкой накопления повреждений в структуре материала, фрактографией шлифов разрушений, дают возможность изучить основные процессы накопления повреждений на стадиях разрушения конструкционного материала и связать их с генерируемыми при этом импульсами АЭ.

Целью настоящей статьи является демонстрация применения разработанных в Институте машиноведения методик кластерного анализа [1, 2], спектральной диагностики [3, 6] и критериаль-

ных параметров [4—6] в условиях усталостных испытаний опорной стойки планера МС-21 для мониторинга в режиме реального времени процесса разрушения адгезионных связей клеевого слоя и динамики отслаивания сбегов стрингеров от полок опорной стойки.

УСТАЛОСТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОПОРНОЙ СТОЙКИ И ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Объект исследования — опорная стойка планера МС-21, усталостные испытания которой выполняли в условиях циклического нагружения, имитирующего критические полетные режимы нагрузки. При симметричном цикле нагружения проводился АЭ-мониторинг процесса отслаивания сбегов стрингеров от опорных полок стойки. Частота нагружения составляла 0,5 Гц, максимальная амплитуда в течение первых 4629 циклов нагружения достигала 200 кН, а в последующих 863 циклах была повышена до 290 кН. В процессе циклических испытаний выполняли АЭ-мониторинг отслаивания полок стрингеров в области их сбегов от основания образца.

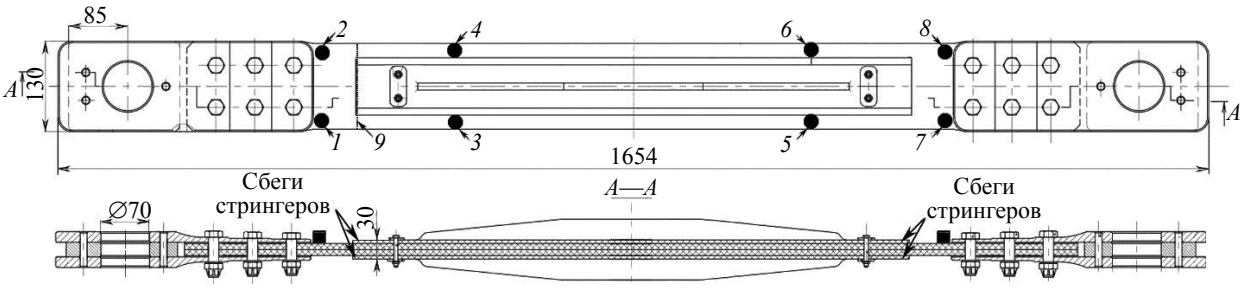

Рис. 1. Конструкция образца опорной стойки с расположением преобразователей АЭ вблизи верхнего (*1—4*) и нижнего (*5—8*) сбегов стрингеров, а также проволочного индикатора отслаивания (*9*).

На рис. 1 приведен эскиз конструкции образца опорной стойки с расположением ПАЭ вблизи сбегов стрингеров и проволочного индикатора отслаивания.

Преобразователи АЭ устанавливались в области верхнего и нижнего сбегов стрингеров. Расстояние между ближайшими ПАЭ по длине стрингеров составляло 170 мм и по ширине — 100 мм. При установке ПАЭ использовались стальные струбцины, которые для улучшения акустического контакта крепились к поверхности стойки через слой технического вазелина.

Для сбора и обработки регистрируемых массивов данных была использована восьмиканальная система A-Line 32D, изготовленная ООО «Интерюнис-ИТ». Локация источников событий АЭ в области сбегов стрингеров осуществлялась с применением резонансных преобразователей R15-a фирма Mistras (США). В качестве предусилителей регистрируемых сигналов применяли ПАЭФ-014, выпускаемые ООО «Интерюнис-ИТ». При планарной локации источников событий АЭ в области верхнего сбега стрингеров использовались ПАЭ с номерами 1—4, а для локации источников событий АЭ в области нижнего сбега стрингеров — с номерами 5—8.

Перед проведением циклических испытаний стойки выполнялось статическое нагружение, в ходе которого прилагаемая нагрузка ступенчато повышалась на 50 кН до максимального уровня $P = 200$ кН. На каждой ступени при достижении максимального уровня нагрузки осуществлялась выдержка в течение 30 с, после чего образец разгружался. После проведения испытаний на статическое растяжение аналогичным образом выполнялись испытания на сжатие, в ходе которого уровень максимальной нагрузки достигал $P = -200$ кН. В ходе этих испытаний определялись оптимальные настройки системы АЭ, включающие порог дискриминации сигналов АЭ – u_{th} = = 42 дБ, полосу пропускания сигналов цифровыми фильтрами — Δf_p: 30—500 кГц и 100—300 кГц, среднюю групповую скорость цуга интерферирующих акустических волн V_g = 48 мм/мкс при максимальном размере локационной решетки 840 мм, а также границы энергетических кластеров для разделения регистрируемых локационных импульсов в поле дескрипторов $E_и$–$N_и/t_и$, составляющие для кластера *H*: $E_и$ = 60—85дБ, $N_и/t_и$ = 10—300 кГц; для кластера *C*: $E_и$ = 85—115 дБ, $N_и/t_и$ = 30—250 кГц; для кластера *B*: $E_и$ = 115—140 дБ, $N_и/t_и$ = 60—180 кГц, отражающие процессы накопления повреждений материала на микро-, мезо- и макромасштабном уровнях.

На рис. 2 приведена схема размещения ПАЭ в диагностируемой зоне образца и редактор зон локации, а на рис. 3 — параметры градации событий АЭ, включающие размер локационных кла-

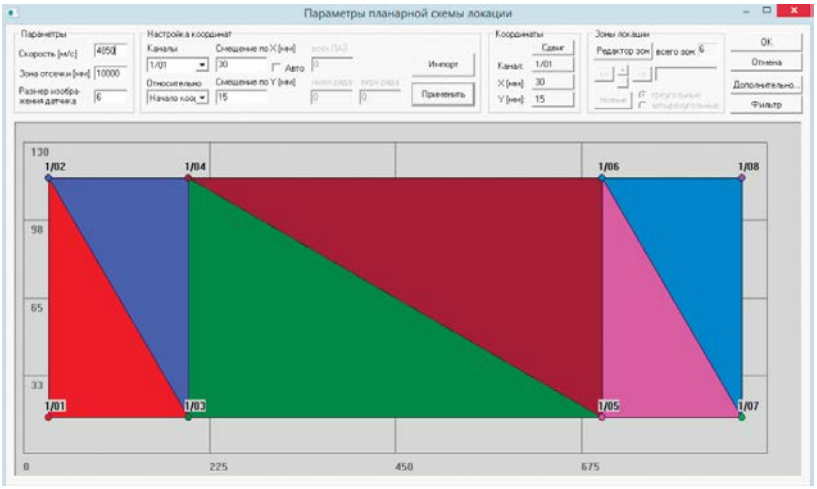

Рис. 2. Схема планарной локации опорной стойки и параметры планарной локации.

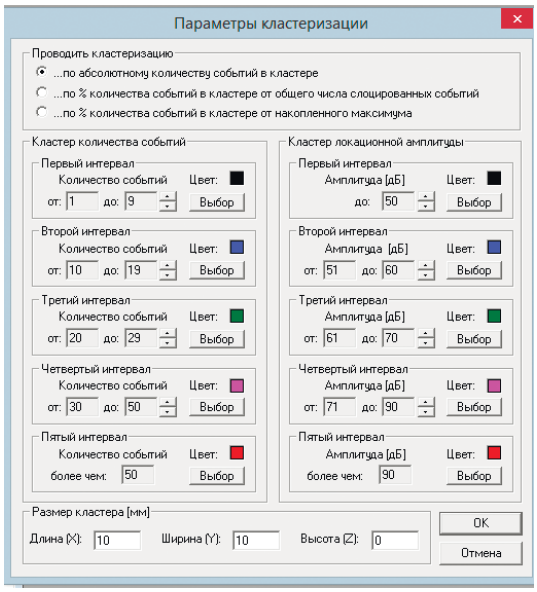

Рис. 3. Параметры кластеризации событий АЭ и амплитуды импульсов в кластерах.

стеров, соотношение между цветом кластеров и количеством регистрируемых событий, а также амплитудой импульсов в кластерах.

На 6928 с испытания образца после 3464 циклов нагружения произошел разрыв индикатора контроля отслаивания — проволоки, натянутой вблизи верхнего сбега стрингера (см. п. *9* на рис. 1) и система блокировки остановила испытательный стенд. В связи со сложностью выполнения ультразвукового контроля (УЗК) теневым методом в условиях стендовых испытаний опорной стойки, УЗК проводился уже после снятия образца опорной стойки с испытательного стенда с использованием дефектоскопа A1214 Expert. Проведенный визуальный осмотр сбега стрингеров не выявил каких-либо внешних нарушений, свидетельствующих об их отслаивании от полок опорной стойки. Поэтому система блокировки стенда была отключена и испытания продолжены. При уровне амплитуды $P_a = 200$ кН было выполнено еще 1499 циклов нагружения, после чего уровень амплитуды в циклах нагружения был повышен до $P_a = 290$ кН. При этом уровне амплитуды было проведено 863 цикла нагружения опорной стойки. По завершению испытаний повторный осмотр также не выявил внешних признаков отслаивания сбегов стрингеров от полок опорной стойки. В результате последующих ультразвуковых исследований были выявлены три зоны отслаивания сбегов стрингеров от полок опорной стойки, приведенные на рис. 4.

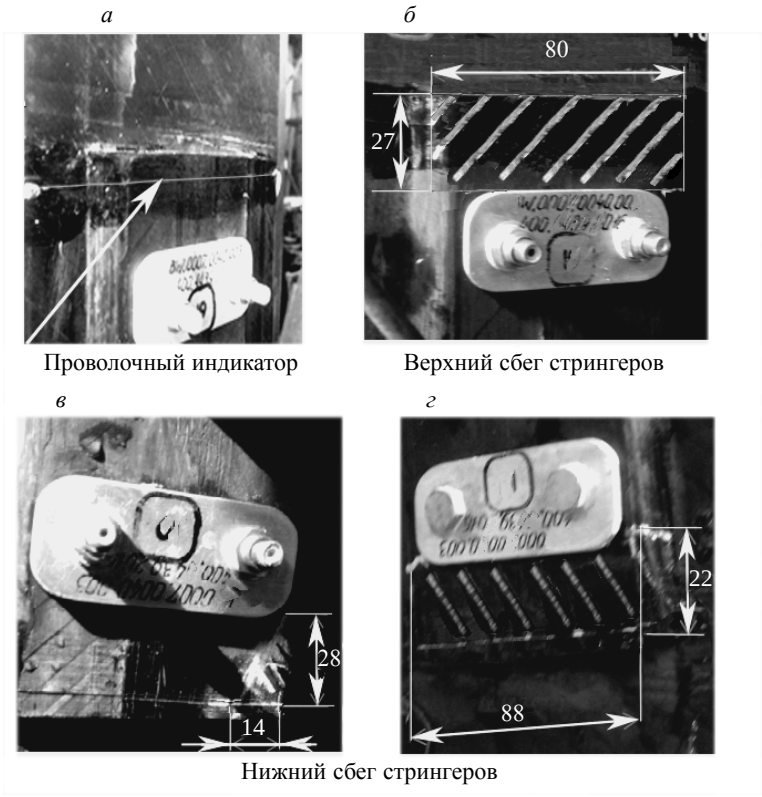

Рис. 4. Проволочный индикатор (*а*) и зоны отслаивания сбегов стрингеров (*б*—*г*) от полок опорной стойки, отмеченные штриховыми линиями, выявленные с применением УЗК.

РЕЗУЛЬТАТЫ АЭ-МОНИТОРИНГА ОТСЛАИВАНИЯ ПОЛОК СТРИНГЕРОВ

Процесс АЭ-мониторинга при усталостных испытаниях опорной стойки, выполняемых при симметричном цикле нагружения, можно разделить на пять этапов:

1) τ_0—τ_1 =153—6928 с мониторинга при P_a = 200 кН продолжался до момента разрыва проволочного индикатора контроля отслаивания стрингеров, расположенного в области верхнего сбега;

2) τ_1—τ_2 = 6928—7768 с — время остановки испытаний после разрыва проволочного индикатора верхнего сбега стрингеров;

3) τ_2—τ_3 = 7768—10248 с — время продолжения испытаний при P_a = 200 кН после разрыва проволочного индикатора;

4) τ_3—τ_4 = 10248—10513 с — время остановки испытаний для перехода на новый уровень амплитуды цикла P_a =290 кН;

5) τ_4—τ_5 = 10513—12242 с — время продолжения испытаний при P_a = 290 кН.

На рис. 5 представлены результаты АЭ-мониторинга процесса отслаивания сбегов стрингеров от полок опорной стойки при усталостных испытаниях.

На рис. 5*а* приведены кривые накопления каналами АЭ-системы локационных импульсов. Всего в ходе испытаний было зарегистрировано $(N_\Sigma)_л$= 135678 АЭ-событий. Наиболее интенсивное накопление локационных импульсов каналами АЭ-системы регистрировалось в области нижнего сбега стрингеров (на рис. 5*б* — справа), в локационной зоне, образуемой ПАЭ № 5—№ 8. Как следует из кривых накопления сигналов АЭ на рис. 5*а*, в области верхнего сбега стрингеров (на рис. 5*б* — слева) — локационной зоне, образуемой ПАЭ № 1—№ 4, скорость накопления локационных импульсов была в 2-4 раза более низкой. Такая неравномерность накопление локационных импульсов обусловлена не только более интенсивным процессом отслаивания стрингеров от полок опорной стойки в области нижнего сбега, но как видно из графиков рис. 6, более активной регистрацией акустических сигналов, вызванных трением, вибрационным и ударным воздействием элементов оправки в области нижней траверсы нагружающего стенда при усталостных испытаниях опорной стойки.

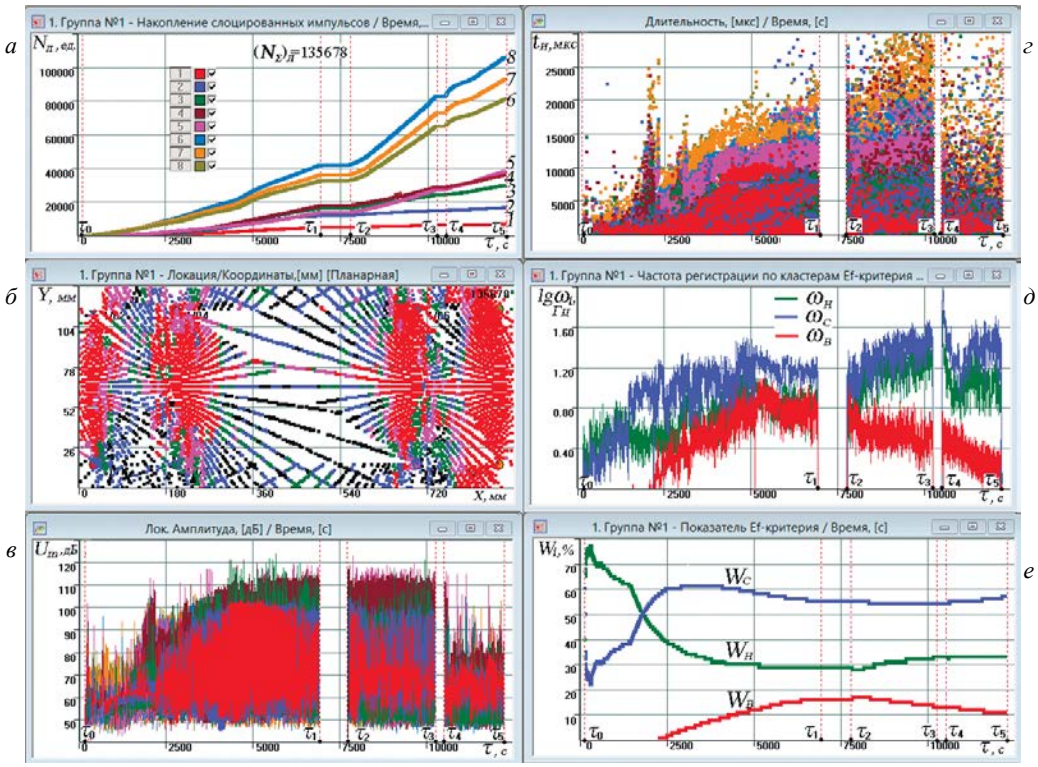

Рис. 5. Результаты АЭ-мониторинга процесса отслаивания сбегов стрингеров от полок опорной стойки при усталостных испытаниях.

Большой массив регистрации помех АЭ вблизи нижнего сбега стрингеров, где были установлены преобразователи АЭ № 5— № 8, прежде всего обусловлен цифровыми фильтрами, применяемыми для этих ПАЭ, которые имели полосу пропускания сигналов Δf_p = 30—500 кГц. Для преобразователей № 1—№ 4 использовались фильтры с полосой пропускания Δf_p = 100—300 кГц, отрезающие низкочастотные шумовые сигналы.

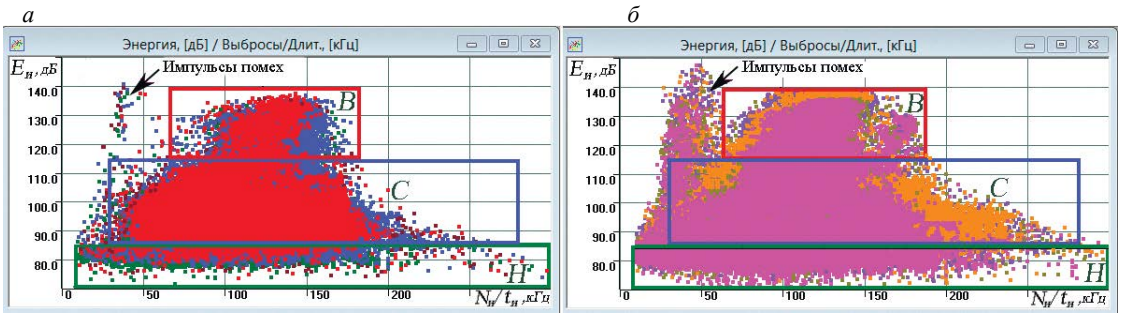

Рис. 6. Импульсы массивов помех, выделенные в поле дескрипторов $E_и$—$N_и/t_и$ и зарегистрированные при усталостных испытаниях опорной стойки в областях верхнего (*а*) и нижнего (*б*) захватов нагружающего стенда.

На рис. 5*б* представлены результаты координатной локации АЭ-событий, зарегистрированные в ходе циклических испытаний стойки с применением резонансных преобразователей R15-α. Наибольшая их плотность $N_л$ > 50 ед/см^2, отмеченная согласно установленной градации АЭ-событий на рис. 3 кластерами красного цвета, была зарегистрирована в местах размещения ПАЭ вблизи верхнего (слева) и нижнего (справа) сбегов стрингеров.

На рис. 5*в* и *г* показана динамика изменения максимальной амплитуды и длительности локационных импульсов, регистрируемых в ходе АЭ-мониторинга образца. В течение первых 1000 циклов нагружения опорной стойки до 2000 с испытания, выполняемом при P_a = 200 кН

на этапе τ_0—τ_1 АЭ-мониторинга, регистрировался постепенный рост максимальной амплитуды и длительности локационных импульсов, уровень которых в конце этого периода достигал соответственно: u_m= 80 дБ, t_u = 10 000 мкс. В интервале 2100—2450 с испытания ПАЭ № 5— № 8, установленные вблизи нижней траверсы нагружающего стенда, регистрировались высокоэнергетические импульсы большой амплитуды и длительности, вызванные ударным воздействием в результате ослабления винтовой стяжки крепления оправки в нижнем захвате опорной стойки. В период 2500—5000 с испытания продолжался рост параметров u_m и t_u локационных импульсов, регистрируемых всеми каналами АЭ-системы, что характерно для процессов масштабного нарушения адгезии и отслаивания сбегов стрингеров от полок опорной стойки. Максимальный уровень амплитуды и длительности локационных импульсов, достигающий соответственно: u_m=100—120 дБ, t_u= 30 000 мкс регистрировался после 2500 циклов нагружения в период 5000—6928 с мониторинга, а также на этапе τ_2—τ_3 = 7768—10 248 с испытания опорной стойки. Как следует из рис. 5*в*, *г*, наиболее интенсивное разрушение адгезионных связей и отслаивание сбегов стрингеров происходило после 2500 циклов нагружения на этапе τ_0—τ_1 и после разрыва проволочного индикатора на этапе τ_2—τ_3 мониторинга. При этом сигналы максимальной амплитуды и длительности регистрировались ПАЭ № 5—№ 8 в области нижнего сбега стрингеров, где их уровень соответственно превышал u_m > 100 дБ и $t_u \geq$ 30 000 мкс. На заключительном этапе τ_4—τ_5 в период 10 513—12 242 с испытания, проводившемся при амплитуде циклов нагружения P_a = 290 кН, значения этих параметров для основного массива локационных импульсов заметно снижались и не превышали соответственно: $u_m \leq$ 90 дБ, $t_u \leq$ 15 000 мкс. Такой характер изменения уровня параметров регистрируемых локационных импульсов был вызван расширением области отслаивания сбегов стрингеров и переходом процесса в новые зоны, где когезионные и адгезионные связи клеевого слоя были разрушены в меньшей степени.

На рис. 5*д*, *е* показана динамика изменения частоты регистрации ω_i и весового содержания локационных импульсов W_i в энергетических кластерах (i —H, C, B). Если в первые 200 циклов нагружения частота регистрации импульсов, относящихся к кластеру H, практически вдвое превышала частоту регистрации в кластере C, а весовое их содержание соответственно составляло: W_H = 77 %, W_C = 23 %, то в дальнейшем характер регистрации и накопления локационных импульсов в кластерах кардинально изменились. Резко возрастают частота регистрации и весовое содержание локационных импульсов в среднем кластере и синхронно снижаются в нижнем. Уже после первой 1000 циклов нагружения на 2000 с испытания частота регистрации импульсов, относящихся к кластеру C — ω_C = 13 Гц, в два с половиной раза превышает в кластере H — ω_H = = 5 Гц, а весовое их содержание в этих кластерах выравнивается. В период 2000—5000 с испытания опорной стойки частота регистрации локационных импульсов в кластере C возросла до ω_C = 30 Гц, тогда как в кластере H не превышала ω_H = 13 Гц. При этом уровень параметра W_C возрастал до 59—61 %, а параметра W_H снижался до 30 %. В этот период наблюдается заметный рост высокоэнергетических импульсов, частота регистрации которых достигает ω_B = 10 Гц, а весовое содержание — W_B = 11 %. Дальнейшее нагружение опорной стойки до момента разрыва проволочного индикатора, произошедшего на 6928 с испытания, характеризуется стабилизацией частоты регистрации и весового содержания локационных импульсов в кластере H, незначительным падением этих параметров в кластере C и ростом в кластере B, максимальные значения которых за 505 с до остановки стенда составляли соответственно: ω_B = 13 Гц, W_B = 16 %.

На этапе мониторинга τ_2—τ_3 после разрыва проволочного индикатора, в течение первых 200 с испытаний, при сохранении частоты регистрации локационных импульсов в кластере B на уровне ω_B = 10—13 Гц величина параметра W_B на 7910 с повысился до 17 %. Такой уровень сохранялся до 8290 с испытания, после чего частота регистрации и весовое содержание высокоэнергетических импульсов начало заметно снижаться, достигая соответственно: ω_B = 6 Гц и W_B = 13 % на 10129 с мониторинга. Падение уровня этих параметров в верхнем энергетическом кластере сопровождалось заметным ростом частоты регистрации локационных импульсов в кластерах H и C до ω_H = 25 Гц и ω_C = 45 Гц соответственно. При этом весовое их содержание в период 8290—10248 с испытания изменилось незначительно в пределах W_H = 29—32 %, W_C = 54—55 %.

На заключительном этапе мониторинга τ_4—τ_5, включающем 10 513—12 242 с испытаний, проводившемся при повышении амплитуды симметричного цикла до P_a = 290 кН, продолжилось снижение уровня критериальных параметров в кластере B соответственно до ω_B = 2—3 Гц и W_B = 11 %, сопровождаемое синхронным ростом величины этих параметров в кластере C соответственно до ω_C = 80—100 Гц и W_C = 57 % при неизменном уровне параметров ω_H = 25—30 Гц и W_H = 33 % в кластере H. Такой характер изменения уровня критериальных параметров на последнем этапе мониторинга свидетельствует о том, что в области сбегов стрингеров процесс нарушения

адгезии и отслаивания от полок опорной стойки начал расширяться и смещаться от краев к центру, вследствие чего уровень регистрации высокоэнергетических импульсов W_B стал снижаться и соответственно повысилось процентное содержание импульсов, относящихся к среднему энергетическому кластеру W_C.

На рис. 7 показаны результаты разделения на кластеры локационных импульсов по их спектральным характеристикам в поле параметров η—f на этапе постобработки результатов АЭ-мониторинга, отражающих соотношение пиковой плотности энергии Hf_m, регистрируемой на частоте f_m, к плотности энергии Hf_R на резонансной частоте f_R, преобразователя R15-а, в полосе пропускания цифрового фильтра Δf = 30—500 кГц.

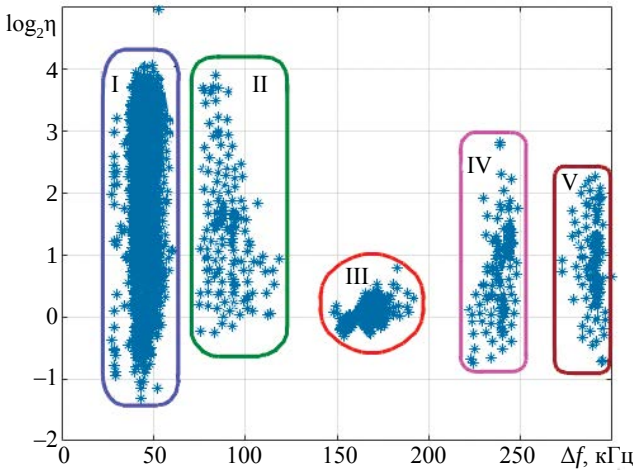

Рис. 7. Разделение локационных импульсов, зарегистрированных в процессе АЭ-мониторинга опорной стойки, на энергетические кластеры I—V в поле параметров η – Δf с применением коэффициента парциальной плотности энергии $\eta = Hf_m / Hf_R$, выделяемой на пиковой частоте f_m регистрируемого максимума и частоте резонанса f_R=160 кГц ПАЭ R15-α в полосе пропускания цифрового фильтра Δf =30—500 кГц.

В поле параметров η—Δf все регистрируемые преобразователями R15-α в ходе АЭ-мониторинга локационные импульсы сформировали пять энергетических кластеров, отражающих в процессе циклического нагружения опорной стойки наличие АЭ-помех в виде вибраций,

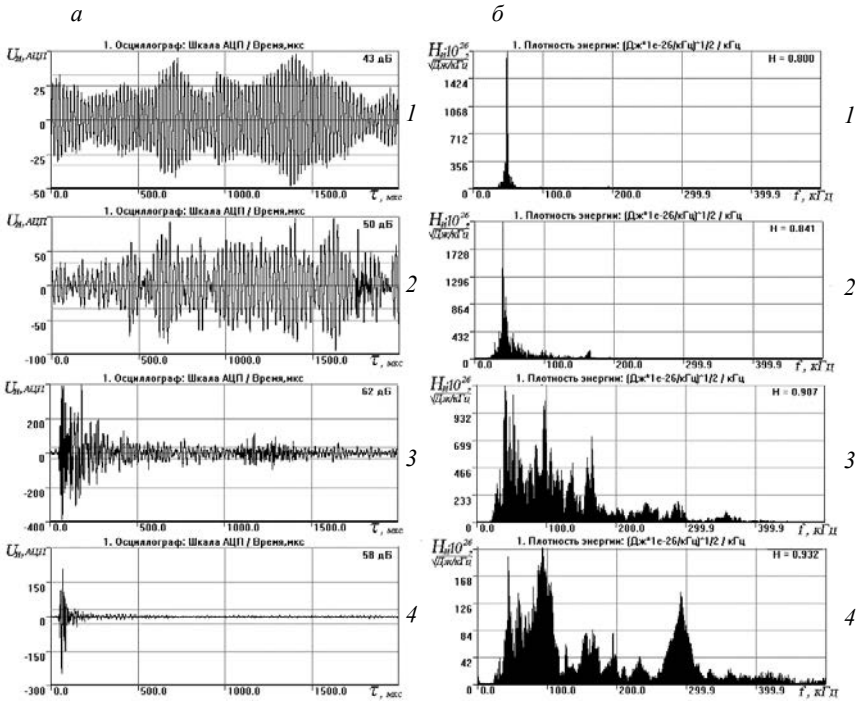

Рис. 8. Формы (*а*) и спектры (*б*) АЭ-помех, регистрируемые от действия вибраций (*1*), трения сопрягаемых элементов оправки и захватов нагружающего стенда (*2*), ударных воздействий (*3*), электромагнитных шумов (*4*).

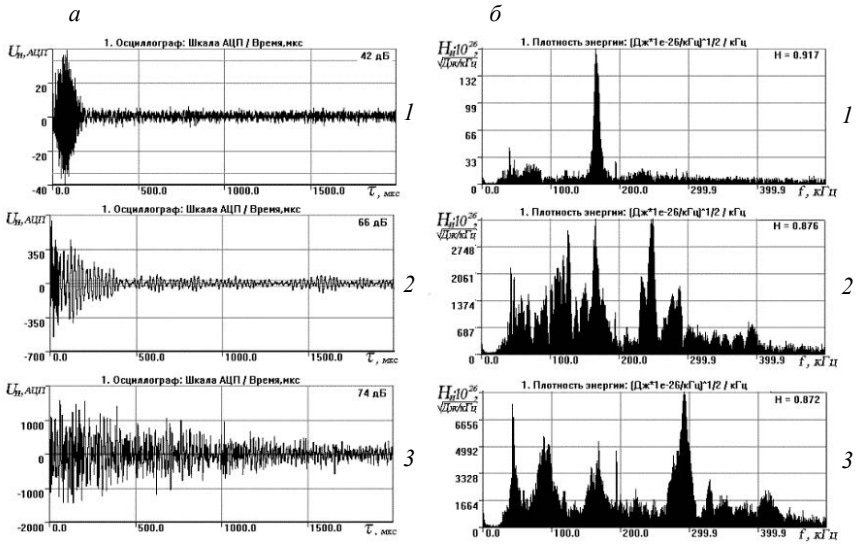

Рис. 9. Формы (*а*) и спектры (*б*) сигналов АЭ, регистрируемые в результате разрушения когезионных (*1*) и адгезионных связей (*2*) клеевого слоя, локального отслаивания (*3*) сбегов стрингеров от полок опорной стойки.

трения элементов оправки нагружающего стенда (кластер I), ударных воздействий и электромагнитных шумов (кластер II), и сигналов, возникающих в результате разрушения когезионных и адгезионных связей в клеевом слое на границе скрепления сбегов стрингеров с полками опорной стойки, и их локального отслаивания в области сбегов стрингеров (кластеры III—V). На рис. 8 и 9 приведены типичные формы и спектры импульсов, характерные для АЭ-помех (кластеры I—II) и сигналов (кластеры III—V), генерированных в процессе усталостного разрушения клеевого соединения на границе скрепления сбегов стрингеров с полками опорной стойки.

Необходимо подчеркнуть, что разделение на этапе постобработки зарегистрированного в ходе АЭ-мониторинга массива локационных импульсов на характерные для выделенных источников сигналов кластеры было получено при использовании преобразователей R15-α с резонансной частотой f_R = 160 кГц при полосе пропускания цифрового фильтра системы АЭ Δf = 30—500 кГц. При использовании других ПАЭ с иной резонансной частотой и (или) полосой Δf пропускания цифрового фильтра границы кластеров выделенных источников АЭ-сигналов и помех в поле дескрипторов η—*f* могут заметно отличаться от приведенных на рис. 7, также как формы и спектры основных типов регистрируемых импульсов, показанных на рис. 8 и 9.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АЭ МОНИТОРИНГА

Разработанные методики кластерного анализа, спектральной диагностики и новые критериальные параметры W_i и ω_i, используемые для мониторинга процесса накопления повреждений в структуре конструкционного материала и оценки остаточной прочности изделия, были успешно применены в условиях усталостных испытаний опорной стойки планера МС-21. При этом можно выделить следующие основные результаты исследований.

1. Представленные на рис. 5 результаты АЭ-мониторинга при циклическом нагружении опорной стойки наглядно отражают зоны наиболее интенсивного разрушения когезионных и адгезионных связей клеевого соединения, и динамику процесса отслаивания стрингеров от полок опорной стойки в области верхнего и нижнего сбегов стрингеров.

2. Выявлены не только зоны наиболее интенсивного разрушения клеевого соединения и отслаивания сбегов стрингеров от опорных полок, но и определен момент — 6423 с мониторинга, когда частота регистрации и весовое содержание высокоэнергетических импульсов на этапе τ_0—τ_1 достигло максимальных значений: ω_B = 13 Гц, W_B = 16 %, что произошло за 505 с до разрыва проволочного индикатора и свидетельствовало об активном разрушении адгезионных связей клеевого слоя и локальном отслаивании сбегов стрингеров от опорных полок.

3. Как следует из рис. 5*д*, *е*, максимальная интенсивность процесса нарушения адгезии и отслаивания стрингеров в области верхнего и нижнего сбега регистрировалась на этапе τ_2—τ_3, когда частота регистрации локационных импульсов в кластере *B* находилась на уровне ω_B = 10—13 Гц,

а величина параметра W_B на 7910 с мониторинга повышалась до 17 % и сохранялась на этом максимальном уровне в течение 380 с испытания.

4. На заключительном этапе мониторинга τ_4—τ_5, проводившемся при повышении амплитуды цикла до P_a = 2900 кН, как следует из рис. 5*д* и *е*, активность регистрации высокоэнергетических импульсов заметно снижалась. Такой характер изменения тренда динамики параметров ω_B и W_B вероятно обусловлен тем, что зона локального отслаивания начала расширяться и смещаться от сбегов к центру стрингеров, где когезионные и адгезионные связи клеевого слоя, скрепляющего стрингеры с полками опорной стойки, были разрушены в меньшей степени и процесс отслаивания еще не перешел в активную фазу.

5. На фоне локационных импульсов, генерируемых в процессе нарушения адгезии и отслаивания сбегов стрингеров от полок опорной стойки, на рис. 6 в поле параметров E_u—N_u/t_u были выделены массивы помех АЭ, возникающих в результате вибрационного и ударного воздействия, трения элементов оправки стойки в нижнем захвате нагружающего стенда. Основной массив таких помех регистрировался ПАЭ № 5—№ 8, установленными вблизи нижних сбегов стрингеров, цифровые фильтры которых имели полосу пропускания Δf = 30—500 кГц. Применение цифровых фильтров с полосой пропускания сигналов Δf = 100—300 кГц в ПАЭ № 1—№ 5 дало возможность отсечь низкочастотные АЭ-помехи, что позволило более точно отображать динамику изменения частоты регистрации ω_i и весового содержания локационных импульсов W_i в энергетических кластерах *H*, *C*, *B*.

6. Спектральный анализ локационных импульсов, выполненный на этапе пост-обработки результатов АЭ-мониторинга в поле параметров η—Δf (см. рис. 7), отражающих соотношение пиковой плотности энергии H_{fm}, регистрируемой на частоте f_m, к плотности энергии H_{fR} на резонансной частоте f_R = 160 кГц преобразователя R15-α, в полосе пропускания Δf = 30—500 кГц цифрового фильтра, позволил в условиях высокой шумовой нагрузки отделить сигналы, вызванные разрушением клеевого слоя и локального отслаивания сбегов стрингеров, от сопутствующих помех АЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение структурно-феноменологического подхода и новых критериальных параметров ω_i и W_i в ходе АЭ-мониторинга опорной стойки при усталостных испытаниях в условиях симметричного цикла нагружения позволило в режиме реального времени контролировать динамику процесса накопления повреждений и разрушения адгезионных связей клеевого соединения и точно установить момент начала активного отслаивания сбегов стрингеров от полок опорной стойки за 505 с до разрыва проволочного индикатора.

С применением новых критериальных параметров и разработанных методик кластерного анализа, используемых в том числе для разделения локационных импульсов в поле спектральных характеристик, установлена взаимосвязь между процессом разрушения когезионных и адгезионных связей клеевого слоя на границе скрепления сбегов стрингеров с полками опорной стойки, и генерируемыми при этом акустическими сигналами их энергией, формой и спектром. При этом сигналы, генерируемые в результате нарушения адгезии и отслаивания сбегов стрингеров от полок опорной стойки в условиях высокой шумовой нагрузки, удалось отделить от сопутствующих АЭ-помех, возникающих в результате вибрационного и ударного воздействия, трения в механических соединениях, электромагнитных наводок.

Комплексное использование частотных ω_i и весовых W_i параметров регистрации локационных импульсов в энергетических кластерах *H*, *C* и *B* при АЭ-мониторинге исследуемых элементов конструкций позволяет получить более информативную картину повреждения и разрушения конструкционного материала на всех структурных уровнях.

Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В. выражают благодарность Российскому научному фонду за оказанную финансовую поддержку (проект № 18-19-00351).

Матвиенко Ю.Г. и Панков В.А. благодарят Министерство образования и науки за оказанную финансовую поддержку (проект № RFMEFI62518X0044).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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. 2016. № 1. С. 45—57.

2. *Васильев И.Е., Матвиенко Ю.Г., Панков А.В., Калинин А.Г.* Применение методики ранней диагностики повреждений при исследовании авиационной панели // Заводская лаборатория. 2019. № 6. С. 40—56.

3. *Махутов Н.А., Иванов В.И., Васильев И.Е., Чернов Д.В.* Моделирование опасных неустойчивых состояний при формировании насыпного конуса стеклогранулята // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2019. № 1.

4. *Васильев И.Е., Матвиенко Ю.Г., Елизаров С.В., Чернов Д.В.* Способ мониторинга степени деградации структуры материала и определения остаточной прочности изделия / Патент № 2649081 РФ: МПК С 1 G01N 29/14 (2006.01). Патентообладатель Институт машиноведения РАН, № 2017109571. Заяв. 22.03.2017. Опубл. 29.03.2018. Бюл. № 5.

5. *Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В. Иванов В.И., Елизаров С.В.* Критериальные параметры для оценки степени деградации композитных материалов при акустико-эмиссионном мониторинге изделий // Дефектоскопия. 2018. № 12. С. 3—11.

6. *Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В.* Диагностика разрушений и повреждений акустико-эмиссионным методом // Приводы и компоненты машин. 2018. № 5. С. 13—18.

7. *Степанова Л.Н., Рамазанов И.С., Чернова В.В.* Вейвлет-анализ структуры сигналов акустической эмиссии при прочностных испытаниях образцов из углепластика // Контроль. Диагностика. 2015. № 7. С. 54—62.

8. *Степанова Л.Н., Кабанов С.И.* Анализ методов кластеризации сигналов акустической эмиссии / В кн. Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке. 2016. С. 191—192.

9. *Степанова Л.Н., Батаев В.А., Чернова В.В.* Исследование разрушения образцов из углепластика при статическом нагружении с использованием методов акустической эмиссии и фрактографии // Дефектоскопия. 2017. № 6. С. 26—33.

10. *Suzuki H., Takemoto M.* and *Ono K*. A Study of Fracture Dynamics in a Model Composite by Acoustic Emission Signal Processing // Journal of Acousticc Emission. 1993. V. II. № 3. P. 117—128.

11. *Eaton M., Holford K., Featherston C.* and *Pullin R.* Damage in Carbon Fibre Composites: The Discrimination of Acoustic Emission Signals Using Frequency // Journal of Acoustic Emission. 2007. V. 25. № 1. P. 140—148.

12. *Hill E.K., Foti C.J., Leung N.Y., Palacios A.E*. Neural network burst prediction in tall graphite – epoxy vessels from acoustic emission data // Journal of Acoustic Emission. 2012. V. 30. P. 167—179.

13. *Li L, Lomov S.V.* and *Yan X*. Correlation of acoustic emission with optically observed damage in a glass epoxy woven laminate under tensile loading // Composite Structure. 2015. V. 123. P. 45—53.

14. *Stankevych Olena, Skalsky Valentyn*. Investigation and identification of fracture types of structural materials by means of acoustic emission analysis // Engineering Fracture Mechanics. 2016. V. 164. P. 24—34.

15. *Saravanakumar K., Arumugam V.* Effect of milled glass fibers on quasi-static indentation and tensile behavior of tapered laminates under acoustic emission monitoring // Engineering Fracture Mechanics. 2018. V. 201. P. 36—46.

16. *Saeedifar Milad, Najafabadi Mehdi Ahmadi, Zarouchas Dimitrios, Toudeshky Hossein Hosseini, Jalalvand Meisam*. Clustering of interlaminar and intralaminar damages in laminated composites under indentation loading using Acoustic Emission // Composites Part B. 2018. V. 144. P. 206—219.

17. *Andreas J. Brunner*. Acoustic emission analysis for identification of damage mechanisms in fiber-reinforced polymer composites and structural integrity assessment: Selected examples and challenges / Progress in Acoustic Emission XVIII, JSNDI & III AE. 2016. P. 287—292.

18. *El Mahi Abderrahim, Daoud Hajer, Rebiere Jean-Luc, Gimenez Isabelle, Taktak Mohamed* and *Haddar Mohamed*. Damage mechanisms characterization of flax fibers–reinforced composites with interleaved natural viscoelastic layer using acoustic emission analysis // Journal of Composite Materials. Review. 2019. V. 0(0). P. 1—15.