

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 620.179.16:620.179.143

СТРУКТУРНО-ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ И АКУСТИКО-ЭМИССИОННАЯ ДИАГНОСТИКА КОМПОЗИТНЫХ СТРИНГЕРОВ В УСЛОВИЯХ ТРЕХТОЧЕЧНОГО ИЗГИБА

© 2024 г. Ю. Г. Матвиенко^{1, *}, И. Е. Васильев¹, Д. В. Чернов¹, А. Г. Калинин²,
А. В. Панков²¹Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия²Центральный аэрогидродинамический институт им. Н. Е. Жуковского, Жуковский, Россия

*e-mail: ygmavienko@gmail.com

Поступила в редакцию 23.10.2023 г.

После доработки 09.02.2024 г.

Принята к публикации 19.02.2024 г.

Сущность предлагаемой методологии мониторинга кинетики повреждений деформированного материала заключается в установлении соответствия между микро-, мезо-, макро-повреждениями, и генерируемыми при этом импульсами акустической эмиссии. В процессе нагружения изделия регистрируемые импульсы разделяют на потоки импульсов низкого (Н), среднего (С) и верхнего (В) энергетического уровня, соответствующих энергии разрушения структурных связей. Вычисляя текущие значения парциального содержания импульсов акустической эмиссии в Н, С, В кластерах, генерируемых микро-, мезо-, макро-повреждениями, и сопоставляя их с пороговыми, установленными при его разрушении, определяют текущий уровень несущей способности изделия в процессе нагружения. Рассмотрено применение разработанной методологии для выявления зон развивающихся повреждений и оценки текущего состояния несущей способности стрингеров в режиме нагружения при испытаниях на межслойный сдвиг.

Ключевые слова: акустико-эмиссионная диагностика, потоковые параметры парциальная активность, кумулятивное накопление, текущие и пороговые значения, несущая способность, трехточечный изгиб, сдвиговая прочность

DOI: 10.31857/S0235711924030078, EDN: PGZNYO

Современные концепции кинетики повреждений и эволюции разрушения твердого тела, использующие численные методы моделирования и нейронные сети [1–5], позволяют получить вероятностные прогностические тренды разрушения конструкционного материала в потенциально опасных зонах, на основании которых определяют запасы прочности от действия критических нагрузок. При эксплуатации конструкций в зонах развивающихся повреждений процесс их накопления становится нелинейным, что затрудняет предиктивный расчет корректных значений запасов прочности [6–8]. На снижение несущей способности оказывают влияние рассеянные структурные дефекты, ударные воздействия, остаточные напряжения, особенности режимов нагружения и условий эксплуатации. Поэтому возникла актуальная необходимость в создании концепции, отражающей, как общее, так и локальное состояние поврежденности конструкционного материала, разработки методологии контроля фактического уровня несущей способности изделия в процессе эксплуатации.

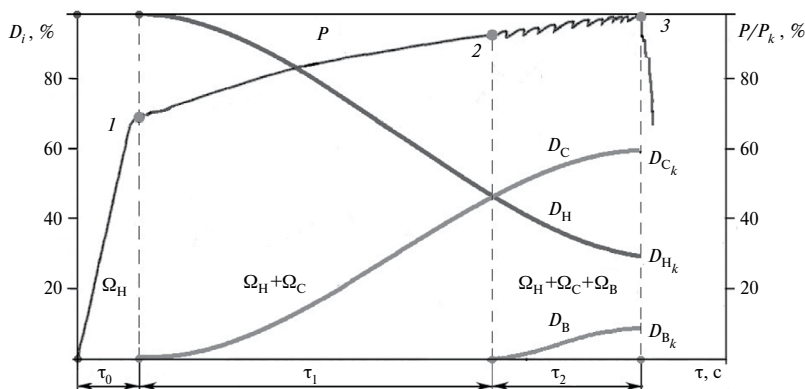


Рис. 1. Кинетика повреждений d_i/d_Σ в структуре ПКМ на микро- d_H , мезо- d_C и макроуровне d_B в процессе возрастания нагрузки P по отношению к предельному значению P_k .

Необходимость контроля степени поврежденности конструкционного материала на микро-, мезо-, макромасштабном уровне и его несущей способности наиболее актуальна при испытаниях и эксплуатации высоконагруженных элементов композитных конструкций, в которых повреждения структурных связей происходят уже на стадии упругих деформаций в результате локального отслаивания связующего при выпрямлении или сжатии армирующих волокон. Полное разрушение структурных связей полимерного композитного материала (ПКМ) происходит при уровнях деформаций не больших 2% [9–15].

В связи со значительной поляризацией прочностных свойств слоистых углепластиков от действия различных видов нагрузок, определяющим фактором разрушения ПКМ часто становится их межслоевая сдвиговая прочность, уровень которой на порядок ниже, чем при растяжении или сжатии композитных конструкций [9–15]. Поэтому мониторинг состояния поврежденности композитного материала в зонах действия максимальных сдвиговых напряжений крайне необходим при технической диагностике несущих элементов конструкций из ПКМ.

Структурно-феноменологический подход, модель и методология применения акустико-эмиссионной (АЭ) диагностики для определения текущего состояния несущей способности конструкций. Разработка структурно-феноменологической концепции (СФК) накопления повреждений на стадиях упругого, неупругого и предельного деформирования материала выполнялась на основании анализа полученных экспериментальных данных при испытаниях на разрыв нитей армирующих волокон и образцов однонаправленного ламината [16, 17]. На рис. 1 показано перераспределение весового содержания $D_i = d_i/d_\Sigma$ микро- (H), мезо- (C) и макроповреждений (B), обозначаемых на схеме символами $D_i = d_i/d_\Sigma$, где d_i — накопленное количество повреждений на каждом масштабно-структурном уровне, а d_Σ — их суммарное значение при испытаниях ПКМ на разрыв от действия нагрузки P .

Концепция предполагает, что на начальной стадии упругого деформирования τ_0 в композитном материале возникают только рассеянные микроповреждения, весовое содержание которых составляет $D_H = 100\%$, а поверхность их разрушения Ω_H по данным микроскопии исследованных образцов однонаправленного ламината не превышает 100 мкм^2 [16, 17]. На стадии τ_1 неупругого деформирования материала в результате эволюции микроповреждения достигают мезомасштабного уровня с поверхностью разрушения $\Omega_C = 100\text{--}1000 \text{ мкм}^2$, что сопровождается снижением парциального содержания микроповреждений D_H и повышением мезоповреждений D_C . На

стадии τ_2 предельного состояния локальные мезоповреждения достигают макромасштабного уровня с поверхностью разрушения $\Omega_B > 1000 \text{ мкм}^2$, что сопровождается дальнейшим падением содержания микроповреждений D_H и синхронным возрастанием мезо- D_C и макроповреждений D_B , которые при повышении до критических значений D_{Ck} и D_{Bk} вызовут разрушение материала в зонах их накопления. Отслеживая в режиме нагружения перераспределение парциального содержания повреждений на разных масштабных уровнях, составляющих в сумме $D_H + D_C + D_B = 100\%$, и сопоставляя их с критическими (пороговыми) значениями D_{Hk} , D_{Ck} и D_{Bk} , можно контролировать фактическое состояние несущей способности изделия.

Для реализации рассматриваемой концепции предложено использовать метод АЭ, который позволяет выявлять развивающиеся дефекты и осуществлять мониторинг кинетики повреждений на разных масштабных уровнях. Метод основан на регистрации импульсов АЭ [18], генерируемых в результате нарушения состояния структурных связей в процессе деформирования материала изделия. Преобразователи акустико-эмиссионных сигналов (ПАЭ), закрепляемые на поверхности конструкции из ПКМ, регистрируют сигналы неупругих смещений, возникающие в результате распрямления армирующих волокон, отслаивания связующего, разрыва, слома и волокон выдергивания из связующего, разрушения структуры матрицы, расслаивания и разрыва слоев. Эволюция разрушения структурных связей в пакете ПКМ сопровождается возникновением импульсов АЭ, активность, энергетические и темпоральные параметры которых характеризуют кинетику повреждений структурных связей. Устанавливая соответствие между микро-, мезо- и макроразрушениями конструкционного материала на стадиях упругого, неупругого и предельного деформирования $\tau_0 - \tau_2$, и потоками импульсов локации источников АЭ, их параметрами, характеризующими энергию и форму сигналов, получаем косвенный способ контроля накопления повреждений на разных масштабных уровнях в процессе испытания или эксплуатации изделия. Такие результаты были получены в ходе испытаний образцов однонаправленного ламината [16] и армирующих волокон [17] на разрыв.

Для мониторинга микро-, мезо- и макроповреждений в структуре конструкционного материала используют потоковые параметры W_i кумулятивного накопления локационных импульсов в Н, С, В кластерах

$$W_H = (N_H/N_\Sigma) \cdot 100\%, \quad W_C = (N_C/N_\Sigma) \cdot 100\%, \quad W_B = (N_B/N_\Sigma) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где N_H, N_C, N_B – кумулятивные значения локационных импульсов в энергетических кластерах ($N_\Sigma = N_H + N_C + N_B$ – суммарное их количество).

Используя феноменологические зависимости между размером микро-, мезо- и макроразрушений и энергией, генерируемых при этом импульсов [16, 17], разработан алгоритм их разделения на энергетические кластеры (Н, С, В) в поле дескрипторов $E_{и} - N_{и}/\tau_{и}$ (относительной энергии и усредненной частоты осцилляций). Для отделения локационных импульсов от сопутствующих помех производится их селекция по полосе пропускания цифровых фильтров Δf , пороговому напряжению $u_m > u_{th}$, длительности $\tau_{и}$ выбросам $N_{и}$ усредненной частоте осцилляций $N_{и}/\tau_{и}$, параметру $u_m/N_{и}$, отражающему крутизну падения амплитуды (тангенс угла наклона) на фазе затухания [18].

Исходя из соответствия потоковых параметров W_i локационных импульсов в Н, С, В кластерах значениям весового содержания микро-, мезо- и макроповреждений в структуре композитного материала [16, 17], разработана методология контроля фактического состояния несущей способности B_W композитного материала в зонах накопления источников АЭ.

На рис. 2а представлена динамика изменения потоковых параметров W_i локационных импульсов в энергетических кластерах, отражающая кинетику перерас-

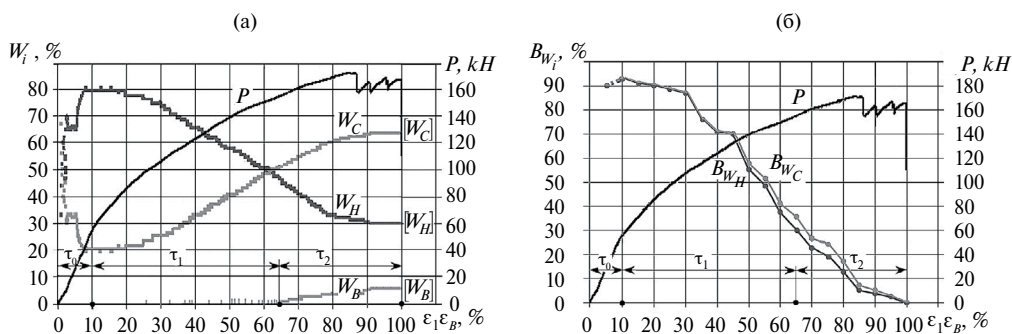


Рис. 2. Динамика параметров W_i в Н, С, В кластерах при повышении уровня $j = \varepsilon_1/\varepsilon_B$ от 5 до 100% (а), графики изменения несущей способности B_{W_H} и B_{W_C} (б), полученные сопоставлением текущих и пороговых значений потоковых параметров W_H и W_C в процессе испытания образца ПКМ на разрыв.

пределения микро-, мезо-, макроповреждений D_i при повышении текущего уровня деформации относительно предельного (соотношение $j = \varepsilon_1/\varepsilon_B$) в диапазоне от 5 до 100%, а на рис. 2б графики падения показателей несущей способности композитного материала B_{W_H} и B_{W_C} , полученные в режиме нагружения изделия, сопоставлением текущих значений потоковых параметров W_i локационных импульсов в Н, С, В кластерах и пороговых их величин $[W_i]$, регистрируемых при разрушении ПКМ.

Динамика изменения потоковых параметров W_i (рис. 2а) наглядно свидетельствует о том, что наиболее информативными, отражающими кинетику парциальных повреждений в структуре композитного материала, являются параметры W_H и W_C . Если параметр W_C отражает только парциальное изменение мезоповреждений в структуре пакета ПКМ, то параметр $W_H = 100 - (W_C + W_B)$ дает информацию о суммарном перераспределении мезо- и макроповреждений ($D_C + D_B = 100 - D_H$). Сопоставляя текущие значения этих параметров с пороговыми $100 - [W_H]$ и $[W_C]$, соответствующими критическим значениям: $D_{Ck} + D_{Bk} = 100 - D_{Hk}$ и D_{Ck} (рис. 1), получаем возможность вычислять фактический уровень несущей способности композитного материала в процессе его деформирования [17].

На стадии рассеянного накопления повреждений τ_0 в натуральных конструкциях уровень весового содержания импульсов в нижнем и среднем кластерах отличается от условно принятого в модели СФК (рис. 1), и составляющего 100% для W_H . Поэтому формулы для подсчета текущего уровня несущей способности композитного материала B_{W_H} и B_{W_C} по параметрам W_H и W_C примут следующий вид:

$$B_{W_H} = \frac{W_H - [W_H]}{(W_H)_{\max} - [W_H]} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

$$B_{W_C} = \frac{[W_C] - W_C}{[W_C] - (W_C)_{\min}} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где $(W_H)_{\max}$, $(W_C)_{\min}$ – предельные значения потоковых параметров, фиксируемые при переходе от рассеянного на стадии τ_0 к локальному на стадии τ_1 накоплению повреждений (рис. 2а), когда весовое содержание локационных импульсов в Н и С кластерах достигает экстремальных значений [17], составляющих $(W_H)_{\max} = 75\text{--}100\%$, $(W_C)_{\min} = 0\text{--}25\%$.

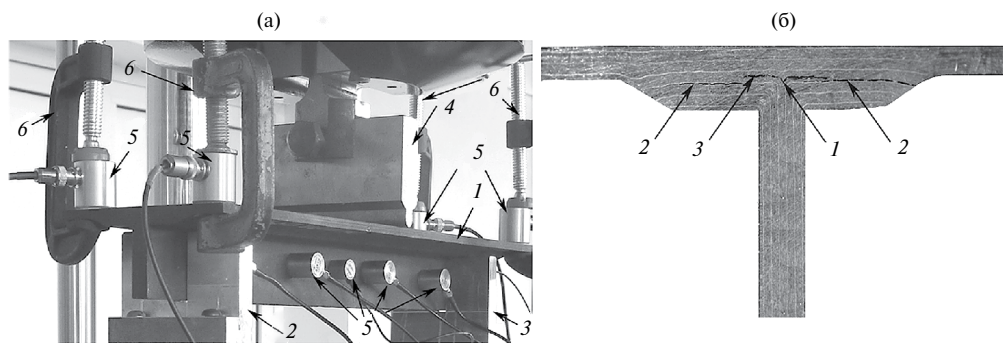


Рис. 3. Испытания стрингера на трехточечный изгиб (а) и вид трещин в полке стрингера, вызванных сдвиговыми напряжениями (б).

Как видно из рис. 2б, показатели несущей способности B_{WH} и B_{WC} , вычисляемые согласно алгоритмам (2) и (3), не совсем совпадают. Их расхождение вызвано тем, что при вычислении показателя B_{WC} по формуле (3) не учитывается величина потокового параметра W_B [17].

Применение разработанной методологии АЭ-диагностики при усталостных испытаниях стрингеров опорной стойки МС-21. Разработанная методология мониторинга степени повреждения композитного материала и определения фактического состояния его несущей способности изделий была протестирована в ходе испытания стрингеров опорной стойки на трехточечный изгиб. В ходе этих испытаний определяли конструкционную прочность стрингеров на межслойный сдвиг. Основной проблемой при испытаниях образцов ПКМ на сдвиг является сложность их закрепления в захватах нагружающего устройства и создание разрушающих нагрузок в контролируемой области. Последнее обусловлено тем, что ПКМ имеет высокую прочность на разрыв, и на порядок меньшую на сдвиг, смятие, срез [9–14]. При оценки прочностных свойств композитного материала на межслойный сдвиг наибольшее распространение получили испытания образцов на трехточечный изгиб [19–21].

Ниже рассмотрено тестирование методики АЭ-диагностики в условиях действия сдвиговых напряжений для мониторинга микро-, мезо- и макроповреждений в структуре ПКМ и оценки уровня несущей способности стрингеров при испытаниях партии из шести образцов на трехточечный изгиб.

На рис. 3а показан стрингер 1, установленный на жестких опорах 2 и 3 на расстоянии 190 мм от нагружающего клина 4. Позиции 5 и 6 соответствуют положениям преобразователей АЭ и крепящих их струбцин к полкам стрингера.

Максимальные сдвиговые напряжения возникали вблизи нейтрального слоя опорной полки стрингера (рис. 3б) в месте ее сопряжения с ребром жесткости (позиция 1), от действия которых происходило расслаивание стрингеров, сопровождающееся образованием, как межслойных (позиция 2), так и внутри слоевых трещин (позиция 3), и потерей несущей способности.

Для мониторинга кинетики повреждений в зонах действия максимальных касательных напряжений, возникающих вблизи нейтрального слоя опорной полки стрингеров в местах расположения опор, применяли восьмиканальную акустико-эмиссионную систему «А-Line 32D» (ООО «Интерюнис-ИТ», РФ). По результатам тестирования аппаратуры в условиях испытаний были выбраны оптимальные настройки: порог дискриминации – $u_{th} = 42$ дБ, полоса пропускания сигналов – $\Delta f = 100\text{--}300$ кГц, расчетная групповая скорость распространения импульсов – $V_g = 2.9$ мм/мкс.

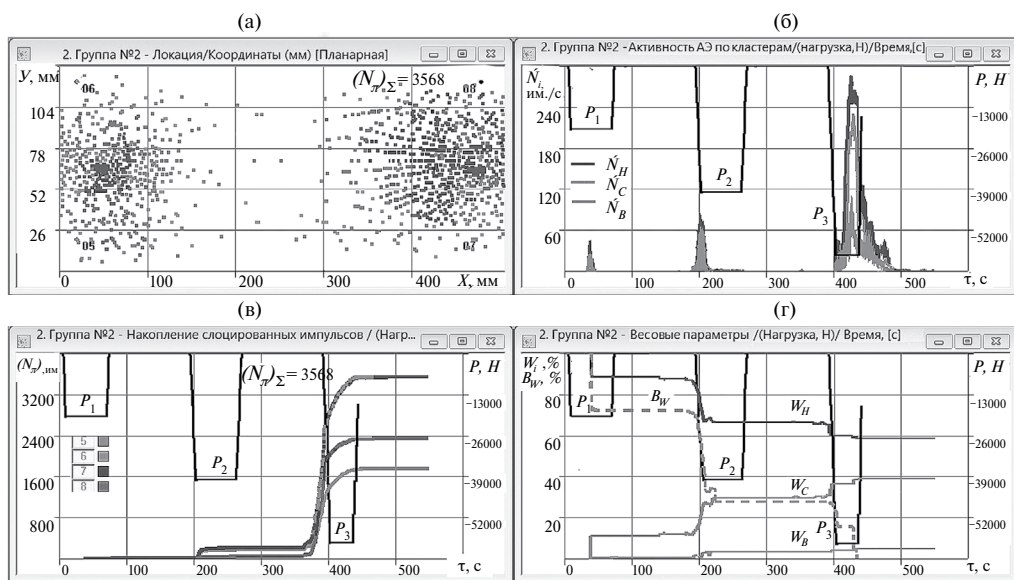


Рис. 4. Результаты АЭ диагностики стрингера № 2, зарегистрированные в течение трех этапов испытаний на трехточечный изгиб.

Испытание стрингеров на трехточечный изгиб выполняли в несколько этапов, на которых уровень прикладываемого усилия сжатия к нагружающему клину дискретно увеличивали на 20 кН, после чего в течение 60 с выполнялась выдержка и нагрузка снималась. Испытания включали 3–4 этапа нагружения, в ходе которых при повышении усилия до $P = -(60–80)$ кН сдвиговые напряжения вызвали расслаивание пакета ПКМ стрингеров вблизи нейтрального слоя опорной полки, что сопровождалось потерей их несущей способности.

Результаты АЭ-диагностики стрингера № 2 при его испытании на трехточечный изгиб показаны на рис. 4.

Потеря несущей способности стрингера произошла на третьем этапе испытания в ходе выдержки при $P = -60$ кН. Распределение плотности источников АЭ в области локации, которая в зоне опор превышала 50 ед./см², показано на рис. 4а. Всего в течение трех этапов нагружения было зарегистрировано $N_{\Sigma} = 3568$ индикаций источников АЭ.

Как следует из графиков на рис. 4б, в, регистрация источников АЭ отмечалась уже на первом этапе испытаний в ходе выдержки при $P_1 = -20$ кН. На втором этапе в процессе повышения нагрузки до $P_2 = -40$ кН активность регистрации локационных импульсов в нижнем и среднем кластерах заметно возросла и достигала уже соответственно $\dot{N}_H = 82$ им./с и $\dot{N}_C = 68$ им./с. Наиболее активная локация источников АЭ отмечалась в период выдержки на третьем этапе испытаний при $P_3 = -60$ кН. При этом парциальная активность в нижнем энергетическом кластере достигала $\dot{N}_H = 282$ им./с, в среднем – $\dot{N}_C = 235$ им./с, в верхнем – $\dot{N}_C = 114$ им./с (рис. 4в). Следствием такой активности явилось существенное перераспределение потоковых параметров W_i в энергетических кластерах (рис. 4г). Если на первом этапе нагружения стрингера экстремальный уровень потоковых параметров в Н, С, В кластерах составлял соответственно: $W_H = 88\%$ и $W_C = 11\%$, $W_B = 1\%$, на втором: $W_H = 67\%$, $W_C = 29\%$, $W_B = 3\%$, то на третьем при потере устойчивости они достигали пороговых значений: $[W_H] = 58\%$, $[W_C] = 38\%$, $[W_B] = 4\%$.

Пунктирной линией на рис. 4г с обозначением B_W показано изменение показателя несущей способности от действия сдвиговых напряжений в области нейтрального слоя полки стрингера № 2 на этапах его испытания на трехточечный изгиб. Линия B_W построена с использованием алгоритма (2), в котором базовые параметры $(W_H)_{\max}$ и $[W_H]$ принимались равными 100 и 58%.

В табл. 1 приведены результаты АЭ-диагностики партии из шести стрингеров № 1, ..., № 6, зарегистрированные при повышении усилия сжатия на этапах их испытания 20–80 кН. Таблица включает: длительность испытания Δt , предельные нагрузки P_B , соответствующие потери несущей способности, количество накопленных АЭ-событий N_{Σ} , пороговые значения потоковых параметров W_i в энергетических кластерах $[W_H]$, $[W_C]$, $[W_B]$, а также результаты статистической их обработки: среднее выборочное значение \bar{a} , среднее квадратичное отклонение S и разброс η интервале $\pm 2S$.

Как следует из табл. 1, при высоком уровне разброса времени испытания и предельных нагрузок, составляющем соответственно 50 и 29%, величина разброса η_{Σ} зарегистрированных источников АЭ не превышала 20%. При этом разброс пороговых значений потоковых параметров W_H и W_C в доверительном интервале $\pm 2S$ для был существенно ниже и не превышал $\eta_{W_H} = 8\%$ и $\eta_{W_C} = 10\%$ относительно средних выборочных значений $[\bar{W}_H] = 58\%$ и $[\bar{W}_C] = 37\%$.

На рис. 5а представлены тренды средних выборочных значений параметров W_i в Н, С, В кластерах и уровней их разброса η_{W_i} в интервале $\pm 2S$ при повышении уровня изгибающей нагрузки $j = P_i/P_B$ от 35 до 100% при испытаниях партии стрингеров № 1, ..., № 6 на трехточечный изгиб.

Тренды изменения средних выборочных значений потоковых параметров \bar{W}_i в Н, С, В кластерах отображены на рис. 5а сплошными линиями, а пунктирными – значения их разброса в интервале $\pm 2S$ при повышении уровня j в диапазоне от 35 до 100%. С ростом уровня j от 35 до 100% отмечалось практически линейное снижение средних выборочных значений параметра \bar{W}_H с 88 до 58%, сопровождаемое синхронным ростом параметра \bar{W}_C от 10 до 37% и \bar{W}_B до 5%. При этом разброс параметра W_H относительно средних выборочных значений \bar{W}_H в доверительном интервале $\pm 2S$ при повышении уровня j от 35 до 100% снижался с $(\eta_{W_H})_{0.35} = 26\%$ до $(\eta_{W_H})_{1.0} = 8\%$, тогда как разброс W_C был заметно выше и достигал $(\eta_{W_C})_{0.35} = 95\%$.

На рис. 5б сплошной линией с обозначением B_W показан график снижения показателя несущей способности образцов, построенный по средним выборочным

Таблица 1. Данные испытаний на трехточечный изгиб образцов стрингеров № 1, ..., № 6 и результаты их статической обработки

№	Δt , с	P_B , кН	$(N_{\Sigma})_{\text{л. ед.}}$	$[W_H]$, %	$[W_C]$, %	$[W_B]$, %
1	405	60	2992	62	35	3
2	426	60	3568	58	38	4
3	481	60	3646	61	35	4
4	619	72	3725	60	35	5
5	705	80	3920	58	37	5
6	724	80	4067	57	36	7
$\bar{a} = \sum a_i/n$	560	69	3653	58	37	5
S	141	10	372	2.2	1.86	1.37
$\eta = 2S/\bar{a}$, %	50	29	20	8	10	58

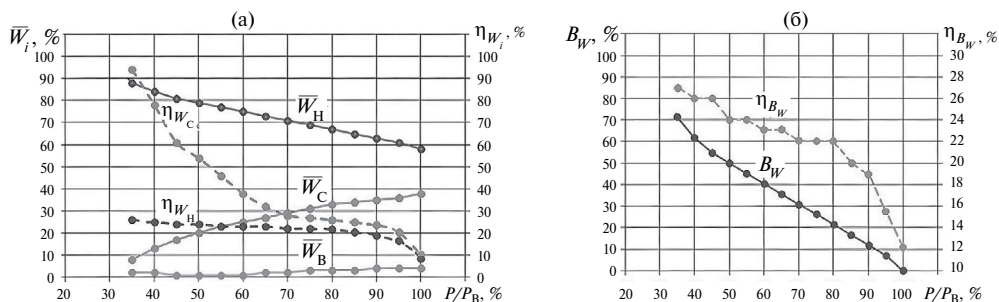


Рис. 5. Графики средних выборочных значений параметров \bar{W}_i в кластерах Н, С, В и уровне их разброса η_{W_i} в интервале $\pm 2S$ (а), используемые для подсчета несущей способности стрингеров B_W и оценки ее возможной погрешности η_{B_W} (б) при росте соотношения $j = P_j/P_B$ от 35 до 100%.

значениям параметров \bar{W}_H с использованием зависимости (2) и уровне граничных значений: $(\bar{W}_H)_{\max} = 88\%$ и $[\bar{W}_H] = 58\%$. Ломанной линией с обозначением η_{B_W} отображено изменение вероятной погрешности показателя несущей способности для испытанной партии стрингеров, подсчитанного по результатам разброса средних выборочных значений потоковых параметров $(\bar{W}_H)_{\max}$ и $[\bar{W}_H]$, который снижался с 27% при $j = 0.35$ до 12% при $j = 1.0$.

Выводы. 1. На основании СФК разработаны основы методологического подхода применения АЭ-диагностики для эволюции разрушения композитных конструкций, использующего потоковые параметры парциальной активности и весового содержания локационных импульсов в энергетических кластерах нижнего, среднего и верхнего уровня. Сопоставляя в режиме нагружения изделия текущие и пороговые значения потоковых параметров W_i в Н, С, В кластерах, отражающих кинетику микро-, мезо- и макроповреждений в зонах локации источников АЭ, с использованием алгоритмов (2) и (3) определяют фактический уровень несущей способности композитного материала. **2.** С целью тестирования разработанной методологии для контроля степени поврежденности композитного материала на микро-, мезо- и макромасштабном уровне от действия сдвиговых напряжений и оценки состояния его несущей способности рассмотрены испытания на трехточечный изгиб стрингеров опорной стойки фюзеляжа МС-21. Показанные на рис. 5а тренды средних выборочных значений потоковых параметров W_i в Н, С, В кластерах для испытанной партии стрингеров, отображают кинетику микро-, мезо- и макроповреждений структурных связей стрингера от действия сдвиговых напряжений в зонах опор, приводящую к снижению среднего уровня их несущей способности с $B_W = 72\%$ до нулевых значений (рис 5б) при повышении изгибающей нагрузки $j = P_j/P_B$ от 35% (2–3 кН) до 100% (6–8 кН). При этом погрешность η_{B_W} показателя несущей способности, вычисляемая по результатам статистической обработки разброса параметров \bar{W}_H и $[\bar{W}_H]$ при повышении соотношения j от 35 до 100%, снижалась с 27 до 12%. **3.** Рассмотренная в статье структурно-феноменологическая концепция и методология ее реализации с применением АЭ диагностики дает представление о возможностях использования метода акустической эмиссии для мониторинга фактического состояния несущей способности материала образцов и конструкций в условиях их стендовых испытаний.

Финансирование. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института (проект № FFGU-2024-0020, тема 3-13). Никаких дополнительных средств на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Makhtov N., Gadenin M., Reznikov D., Nadein V.* Risk and industrial safety // Reliability: Theory & Applications. 2022. V. 17. № S3 (66). P. 138.
2. *Лепихин А. М., Морозов Е. М., Махутов Н. А., Лещенко В. В.* Возможности оценки вероятностей разрушения и допустимый размеров дефектов элементов конструкций по критериям механики разрушения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88. № 3. С. 41.
3. *Лепихин А. М., Махутов Н. А., Шокин Ю. И., Юрченко А. В.* Концепция риск-анализа технических систем с использованием цифровых двойников // Вычислительные технологии. 2020. Т. 25. № 4. С. 99.
4. *Панов А. Н.* Риск-ориентированное проектирование в машиностроении // Стандарты и качество. 2021. № 9. С. 106.
5. *Yoshimura S., Kanto Y.* Probabilistic failure mechanics for risk-informed activities. Fundamentals and applications. Atomic Energy Research Committee, 2020. 380 p.
6. *Лепихин А. М.* Риск-анализ конструкции потенциально опасных объектов на основе вероятностных моделей: Дисс. ... докт. техн. наук. Новосибирск: ИТПМ СО РАН, 2000. 318 с.
7. *Махутов Н. А.* Безопасность и риски: системные исследования и разработки. Новосибирск: Наука, 2017. 724 с.
8. *Махутов Н. А., Гаденин М. М.* Техническая диагностика остаточного ресурса и безопасности / Под общ. ред. В. В. Клюева. М.: Спектр, 2014. 187 с.
9. *Олейников А. И., Кузьмина Т. А.* Упруго-прочностные характеристики монослоев in situ в композиционном пакете // Инженерный журнал: наука и инновации. 2020. № 7. С. 4.
10. *López-Alba E., Schmeer S., Díaz F.* Energy absorption capacity in natural fiber reinforcement composites structures // J. Materials. 2018. № 11. P. 418.
11. *Yi X.-S., Du S., Zhang L.* Composite Materials. Engineering: Fundamentals of Composite Materials. Vol. 1. Singapore: Springer, 2017. 786 p.
12. *Полулов А. Н.* Экспериментальная механика композитов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. 375 с.
13. *Lubin G.* Handbook of composites. Springer Science & Business Media, 2013. 804 p.
14. *Bessa M.* Meso-mechanical model of the structural integrity of advanced composite laminates: Ph. D. Dissertation. Faculty of engineering University of Porto, 2010. 204 p.
15. *Аннин Б. Д., Жигалкин В. М.* Поведение материалов в условиях сложного нагружения. Новосибирск: Издательство СО РАН, 1999. 342 с.
16. *Махутов Н. А., Матвиенко Ю. Г., Иванов В. И., Васильев И. Е., Чернов Д. В.* Исследование на разрыв армирующих волокон и однонаправленного ламината с применением акустической эмиссии // Приборы и техника эксперимента. 2022. № 2. С. 109.
17. *Матвиенко Ю. Г., Махутов Н. А., Васильев И. Е., Чернов Д. В., Иванов В. И., Елизаров С. В.* Оценка остаточной прочности композитных изделий на основе структурно-феноменологической концепции повреждений и акустико-эмиссионной диагностики // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. № 1. С. 69.
18. *Иванов В. И., Барат В. А.* Акустико-эмиссионная диагностика. М.: Спектр, 2017. 368 с.
19. *Тарнопольский Ю. М., Кинцис Т. Я.* Методы статических испытаний армированных пластиков. М.: ХИМИЯ, 1981. 270 с.
20. Test methods for composites A status report, shear test method, U. S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 1993. С. 30.
21. *Adams D. A.* comparison of shear test methods. URL: <http://www.compositesworld.com/articles/a-comparison-of-shear-test-methods>