

Механика материалов: прочность, ресурс, безопасность

Materials mechanics: strength, durability, safety

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-11-45-61>

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ РАЗРУШЕНИЯ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО ЛАМИНАТА С ПРИМЕНЕНИЕМ АКУСТИКОЙ ЭМИССИИ И ВИДЕОРЕГИСТРАЦИИ

© Юрий Григорьевич Матвиенко, Игорь Евгеньевич Васильев*,
Дмитрий Витальевич Чернов

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, Россия, 101990, Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4; *e-mail: vie01@rambler.ru

*Статья поступила 19 марта 2019 г. Поступила после доработки 15 июля 2019 г.
Принята к публикации 5 августа 2019 г.*

Исследован процесс разрушения пакета однонаправленного ламината при растяжении с помощью акустической эмиссии и видеорегистрации. Изучена кинетика повреждений и разрушений структурных связей в однонаправленном ламинате от действия растягивающей нагрузки с применением акустической эмиссии и синхронно выполняемой видеосъемки. Установлено соответствие между происходящими разрушениями на микро-, мезо- и макромасштабном уровнях пакета ламината и регистрируемыми при этом локационными импульсами, их энергетическими параметрами, формой и спектром. Выполнено тестирование новых критериальных параметров, используемых при акустико-эмиссионном мониторинге, включающих частоту регистрации локационных импульсов в энергетических кластерах и их весовое содержание, а также методики разделения локационных импульсов на кластеры с похожими спектрами. Предложенные параметры позволяют количественно оценивать степень разрушения структурных связей конструкционного материала на всех масштабных уровнях и прогнозировать остаточную прочность изделия. Структурно-феноменологический подход, реализуемый путем разделения всего массива акустико-эмиссионных данных на энергетические кластеры, позволил контролировать степень разрушения структуры материала с применением частоты регистрации и весовое содержание локационных импульсов в кластерах нижнего, среднего и верхнего энергетических уровней. Путем сопоставления событий акустической эмиссии, регистрируемых на стадиях нагружения испытываемых образцов, с кадрами видеосъемки микроисследований накопления повреждений и разрушения структурных связей в пакете однонаправленного ламината установлено соответствие между происходящими разрушениями на микро-, мезо- и макромасштабном уровнях, генерируемыми при этом акустическими волнами и регистрируемыми преобразователями акустической эмиссии локационными импульсами, их энергетическими параметрами, формой и спектром.

Ключевые слова: однонаправленный ламинат; акустическая эмиссия; локационные импульсы; энергетические кластеры; весовое содержание; частота регистрации; видеосъемка.

STUDY OF THE FRACTURE KINETICS OF A UNIDIRECTIONAL LAMINATE USING ACOUSTIC EMISSION AND VIDEO RECORDING

© Yury G. Matvienko, Igor E. Vasil'ev, Dmitry V. Chernov

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Maly Kharitonyevsky per., d. 4, Moscow, 101990, Russia; *e-mail: vie01@rambler.ru

Received March 19, 2019. Revised July 15, 2019. Accepted August 5, 2019.

The kinetics of fracture of structural bonds in a unidirectional laminate package under the effect of tensile load is studied using acoustic emission (AE) combined with video recording. A correspondence between

the fractures occurred at micro-, meso-, and macroscale levels of the laminate package and the location pulses thus recorded, their energy parameters, shape and spectrum is determined. Data on testing of the new criterion parameters used in acoustic emission monitoring, including the frequency of registration of location pulses in energy clusters and their weight content, as well as the methods providing separation of location pulses into the clusters with similar spectra related to the same or similar types of acoustic emission events are presented. The proposed parameters and structural-phenomenological approach implemented through dividing the entire array of acoustic-emission data into energy clusters make it possible to quantify the degree of destruction of structural bonds of structural material at all scale levels and predict the residual strength of the product. Fusion of the acoustic emission events recorded at different stages of specimen loading and images of video recording of damage accumulation and fracture of the structural bonds in a unidirectional laminate package revealed the a correspondence between the fracture of the composite occurred at micro-, meso- and macro-scale levels, acoustic waves thus generated and location pulses, their energy parameters, shape and spectrum.

Keywords: unidirectional laminate; acoustic emission; location pulses; energy clusters; weight content; frequency of registration; video recording.

Введение

В Институте машиноведения им. А. А. Благонравова РАН на протяжении ряда лет исследуют возможность применения метода акустической эмиссии (АЭ) для количественной оценки процесса накопления повреждений и определения остаточной прочности изделий [1 – 2], в том числе изготовленных из современных типов конструкционных материалов в условиях воздействия различного вида статических [3 – 4] и циклических нагрузок [5 – 6]. Для такой оценки используют структурно-феноменологический подход, позволяющий установить перекрестные связи между процессами накопления повреждений и разрушения структурных связей конструкционного материала на микро-, мезо- и макромасштабном уровнях и генерируемыми при этом акустическими сигналами — их энергией, формой и спектром.

Современные методики кластерного анализа импульсов АЭ событий [7], реализуемые с применением метода конечных элементов [8 – 9], нейронных сетей [10 – 12], синхронной видеосъемки накопления повреждений на разных структурных уровнях материала [13 – 15], включающие фрактографические исследования разрушений [16], спектральный и вейвлет-анализ распределения плотности энергии спектров [17 – 20], при комплексном использовании дают возможность установить взаимосвязь между процессами накопления повреждений на стадиях разрушения конструкционного материала и генерируемыми при этом импульсами АЭ [7, 21]. Как показал мониторинг образцов и панелей из композитных материалов, в которых характер распространения и затухания акустических волн достаточно похож, при использовании определенных АЭ систем, ПАЭ с одинаковыми амплитудно-частотными характеристиками (АЧХ), цифровых фильтров с заданной полосой пропускания, а также фиксированного уровня порога дискриминации сигналов регистрируемые импульсы, имеющие сходные энергетические параметры, формы и

спектры, могут быть отнесены к близким по природе источникам излучения.

Кластерный анализ и критериальные параметры

Под кластеризацией понимается способ объединения близких по своим характеристикам анализируемых данных в поле выбранных информативных параметров. В основу алгоритма классификации сигналов АЭ положен кластерный подход, позволяющий в поле экспериментально установленных значений параметров (дескрипторов), характеризующих различные акустико-эмиссионные свойства регистрируемых импульсов, проводить их классификацию. Сигналы, схожие друг с другом по ряду заранее выбранных признаков, относят к одному и тому же кластеру. При этом объектом кластеризации являются импульсы, относящиеся к зарегистрированным АЭ событиям, а в качестве меры их схожести применяют установленные при тестировании границы локализации их параметров на графиках дескрипторов. Под термином «дескрипторы» (описатели) применительно к выбранным параметрам регистрируемых импульсов АЭ понимаются идентификаторы, позволяющие в границах заранее установленных параметров распознавать входящие сигналы, помещая их в кластеры, свойственные определенным источникам АЭ.

Для распознавания сигналов АЭ по энергетическим параметрам и форме наиболее информативны максимальная амплитуда импульса (u_m), его относительная энергия (E_n), длительность (t_n), число осцилляций (N_n) от момента пересечения импульсом уровня порога дискриминации (u_{th}) до ухода импульса АЭ под порог, а также комплексные параметры u_m/N_n , N_n/t_n , характеризующие скорость затухания импульса и усредненную частоту осцилляций [3, 4].

Для выбора универсальных критериальных параметров в качестве объектов исследования использовали не только конструкционно-подобные

образцы (КПО) авиационных панелей [1, 2], но и физические модели — хрупкие оксидные тензоиндикаторы, наклеиваемые на поверхность различных конструктивных элементов, имитирующие структуру разрушения сэндвич-панелей и композитов [4], а также насыпной конус стеклогранулята, при формировании которого моделировался процесс усталостного накопления повреждений [22]. На этих физических моделях и образцах, позволяющих создавать широкую вариабельность условий испытаний, видов прилагаемых нагрузок, механизмов разрушения структуры материала, проводили тестирование и отбор наиболее информативных критериальных параметров, отражающих основные тренды и источники накопления повреждений на микро-, мезо- и макромасштабном уровнях, дающих возможность проводить оценку остаточной прочности, выявлять источники АЭ событий, а также формы и спектры свойственных им локационных импульсов [2, 5, 6].

В процессе разрушения структурных связей конструкционного материала каждый локационный импульс регистрируемого АЭ события отражает энергию, выделяемую при разрыве или повреждении той или иной структурной связи, характеризующую его параметрами, формой и спектром. Для оценки степени таких повреждений локационные импульсы в процессе АЭ мониторинга целесообразно разделять на кластеры нижнего (Н), среднего (С) и верхнего (В) энергетических уровней. При этом градация кластеров по энергетическому параметру составлена таким образом, чтобы формирующие их импульсы отражали процессы разрушения, происходящие в конструкционном материале, на микро-, мезо- и макромасштабном уровнях. Оценка степени повреждения материала на разных структурных уровнях выполняют исходя из динамики изменения весового содержания локационных импульсов в энергетических кластерах: $W_H = (N_H/N_\Sigma) \times 100\%$, $W_C = (N_C/N_\Sigma) \cdot 100\%$, $W_B = (N_B/N_\Sigma) \times 100\%$, где N_H, N_C, N_B — количество импульсов, накопленных в кластерах Н, С, В; N_Σ — суммарное количество зарегистрированных импульсов АЭ событий.

Алгоритм программного обеспечения включает разделение регистрируемых импульсов АЭ событий на энергетические кластеры в установленных границах параметров $E_n - N_n/t_n$, подсчет частоты их регистрации $\omega_i(\tau)$ каждую секунду мониторинга, дифференциальное распределение весового содержания сигналов по уровню параметра E_n в кластерах Н, С, В и ежесекундное вычисление весового содержания импульсов в энергетических кластерах $W_i(\tau)$.

Границы энергетических кластеров, формируемых импульсами АЭ событий в процессе мо-

ниторинга, устанавливают по результатам предварительного тестирования материала изделия, исходя из природы источников излучения импульсов, вида нагружения, типа применяемых преобразователей, настроек АЭ системы, в частности, полосы пропускания цифровых фильтров и уровня порога дискриминации сигналов [1, 2]. Контролируя динамику изменения частоты регистрации и весового содержания локационных импульсов в энергетических кластерах Н, С, В, оценивают степень разрушения материала на разных структурных уровнях и прогнозируют остаточную прочность изделия путем сопоставления с результатами тестовых испытаний образцов материала изделия на разрушение.

При спектральном анализе разделение регистрируемых импульсов на кластеры, в которых сигналы АЭ имеют близкие спектры, относящиеся к аналогичным или близким типам АЭ событий, выполняют на этапе постобработки результатов АЭ мониторинга в поле параметров $\eta - \Delta f$ с использованием коэффициента парциальной плотности энергии $\eta = H_{fm}/H_{fr}$, выделяемой на пиковой частоте f_m регистрируемого максимума и частоте резонанса f_R применяемых преобразователей, в полосе пропускания Δf цифрового фильтра АЭ системы [5, 6].

Испытание образцов на растяжение и диагностическое оборудование

В проводимых экспериментах использовали образцы корсетной формы длиной 340 мм, толщиной 0,8 мм, имеющие ширину в области захватов и в центральной зоне 15 мм, изготовленные по технологии автоклавного формования из препрегов однонаправленного ламината, включающего четыре слоя толщиной 180 мкм $[0^\circ]_{4S}$. При формовании образцов в автоклаве в качестве наружного покрытия применяли термостойкую полиэтиленовую пленку, которую впоследствии удаляли с поверхности.

Испытания образцов проводили на электромеханической установке фирмы Shimadzu со скоростью перемещения активной траверсы 10 мкм/с. В процессе испытания регистрировали нагрузку, перемещение актуатора, деформацию в центральной области образца (минимальном сечении) с применением экстензометра с базой измерения 25 мм. В ходе нагружения проводили видеосъемку процесса разрушения структуры наружного слоя ламината, синхронизированную с АЭ мониторингом регистрации локационных импульсов. Образцы испытывали как в условиях непрерывно повышающегося уровня растягивающей нагрузки до разрушения, так и при поэтапном нагружении. На каждом этапе нагружения с применением отражательного микроско-

па Bresser Science MTL-201 (ФРГ), оборудованного видеокамерой TouPCam U3CMOS16000KPA (КНР), исследовали разрушения микроструктуры наружных слоев лицевой и боковой поверхностей в центральной части образца. Такие исследования проводили для четырех стадий нагружения, характеризующихся различной интенсивностью локации АЭ событий, регистрацией импульсов с различными величинами энергетических параметров, формой и спектром, свойственным разрушению пакета ламината на микро-, мезо- и макромасштабном уровнях. Идентификацию источников АЭ событий, генерирующих локационные импульсы и формирующих энергетические кластеры Н, С, В на стадиях нагружения образцов, осуществляли посредством видеосъемки структуры материала, синхронизированной с АЭ диагностикой, что давало возможность проводить мониторинг развивающихся процессов разрушения, регистрируемых непосредственно при нагружении пакета однонаправленного ламината.

Для сбора и обработки регистрируемых массивов данных применяли восьмиканальную систему A-Line 32D, производства ООО «Интерюнис-ИТ» (РФ), и четырехканальную систему PCI-2 фирмы Mistras (США). Источники АЭ событий регистрировали одновременно резонансными R15-а и широкополосными UT-1000 преобразователями фирмы Mistras (США). В качестве предусилителей регистрируемых сигналов использовали ПАЭФ-014, выпускаемые ООО «Интерюнис-ИТ», и 2-4-6 AST фирмы Mistras.

Перед проведением испытаний определяли оптимальные настройки АЭ системы, включающие: порог дискриминации сигналов АЭ — $u_{th} = 36$ дБ; полосы пропускания цифровых фильтров, установленных для широкополосных ПАЭ № 1, 2 — $\Delta f_p = 50 - 2000$ кГц и № 3, 4 — $\Delta f_p = 30 - 500$ кГц; среднюю групповую скорость цуга интерферирующих акустических волн $V_g = 48$ мм/мкс при максимальном размере локации 240 мм. Исходя из уровня принятого порога дискриминации u_{th} и полосы пропускания цифровых фильтров Δf_p , для локационной группы ПАЭ № 3, 4 устанавливали границы кластеров критериальных параметров для оценки степени повреждения материала в поле дескрипторов $E_n - N_n/t_n$: для кластера Н — $E_n = 55 - 85$ дБ, $N_n/t_n = 10 - 280$ кГц; для кластера С — $E_n = 85 - 115$ дБ, $N_n/t_n = 40 - 240$ кГц; для кластера В — $E_n = 115 - 145$ дБ, $N_n/t_n = 80 - 180$ кГц. Эти границы кластеров отражают процессы, соответствующие разрушению структурных связей композитного материала на микро-, мезо- и макромасштабном уровне.

Результаты мониторинга испытания на растяжение пакета однонаправленного ламината

Рассмотрим результаты испытания образца в условиях непрерывно повышающегося уровня растягивающей нагрузки до момента разрушения слоев ламината. Данные АЭ мониторинга, получаемые с применением широкополосных преобразователей UT-1000 и системы PCI-2, использовали для верификации АЭ событий, сопоставления энергетических и временных параметров, формы и спектра сигналов, регистрируемых преобразователями R15-а.

На рис. 1 показаны результаты мониторинга АЭ событий, зарегистрированных ПАЭ № 3, 4 в течение 415 с испытания при непрерывном повышении уровня растягивающей нагрузки до $P_B = 11\,880$ Н.

На рис. 1, а показана координатная локация АЭ событий, зарегистрированных резонансными преобразователями R15-а в ходе испытаний композитного образца при повышении уровня растягивающей нагрузки до $P_B = 11\,880$ Н. Наибольшая их плотность, достигающая $N_d = 270$ ед./мм, отмечалась в центральной области образца — минимальном сечении, где разрушение структуры ПКМ происходило наиболее интенсивно. Всего в процессе испытаний исследуемого образца на разрушение второй группой ПАЭ (№ 3, 4) было зарегистрировано $(N_{\Sigma})_d = 7522$ АЭ события. Динамика накопления АЭ событий в процессе эксперимента, приведенная на рис. 1, б, характеризуется тангенсом угла наклона кривой накопления событий ($\alpha_i = 1, \dots, 4$), который представляет собой средний уровень активности их регистрации в единицу времени (рис. 1, в). Исходя из угла наклона α , процесс накопления АЭ событий (см. рис. 1, б) может быть разбит на четыре характерные стадии нагружения ($\tau_1 = 65 - 205$ с, $\tau_2 = 205 - 327$ с, $\tau_3 = 327 - 391$ с, $\tau_4 = 391 - 415$ с), каждая из которых отражает степень повреждения и разрушения структурных связей композитного материала на микро-, мезо- и макромасштабном уровнях. При этом максимальные растягивающие усилия, прикладываемые к образцу, в рассматриваемые интервалы времени достигали: $P_1 = 4900$ Н на 205 с периода τ_1 ; $P_2 = 9100$ Н на 327 с периода τ_2 ; $P_3 = 11\,400$ Н на 391 с периода τ_3 ; $P_4 = 11\,960$ Н на 411 с периода τ_4 , что составляло 41, 77, 96 и 100,7 % от разрушающей нагрузки $P_B = 11\,880$ Н.

На рис. 2 показаны распределение регистрируемых событий АЭ в зоне локации образца, их накопление и активность регистрации в период $\tau_1 = 65 - 205$ с испытания, а также частота регистрации локационных импульсов в кластерах Н и С.

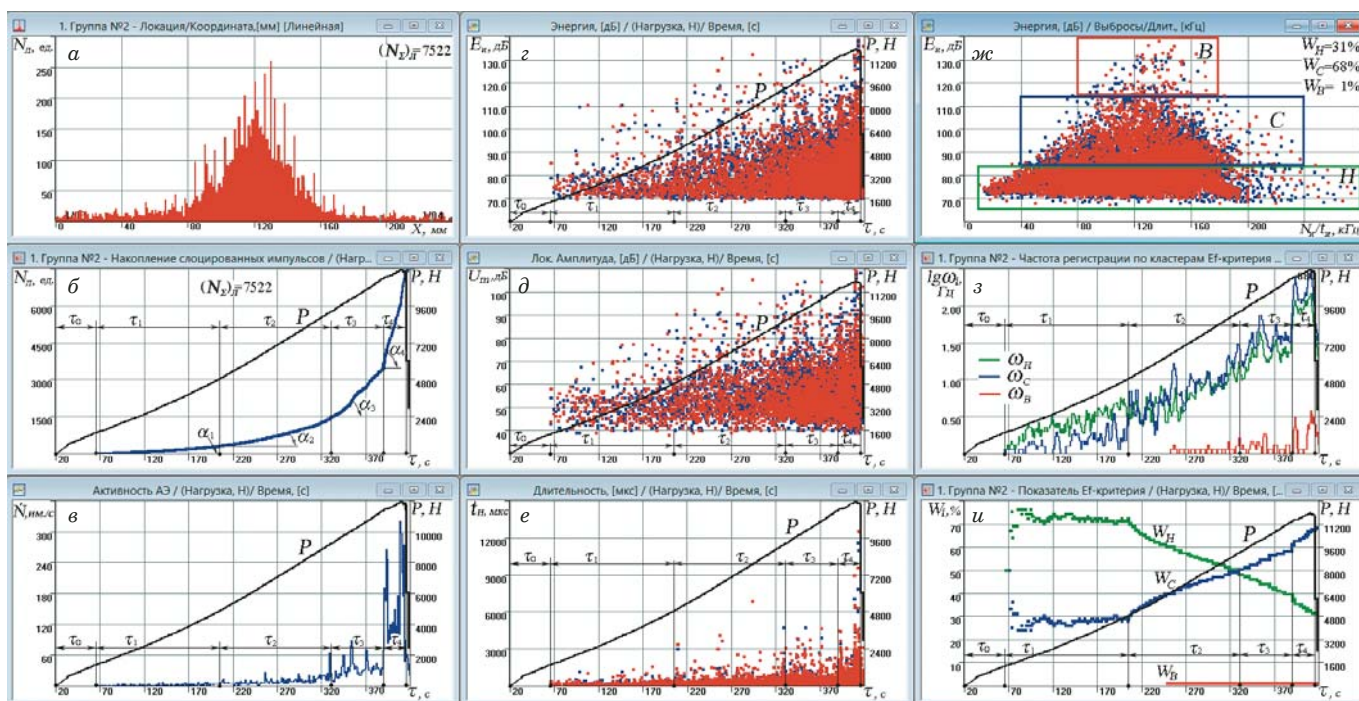


Рис. 1. Результаты АЭ мониторинга образца композитного материала при испытаниях на растяжение, полученные второй локационной группой (ПАЭ № 3 и 4)

Fig. 1. Results of AE monitoring of the unidirectional laminate specimen during tensile tests obtained by the second location group (AET Nos. 3 and 4)

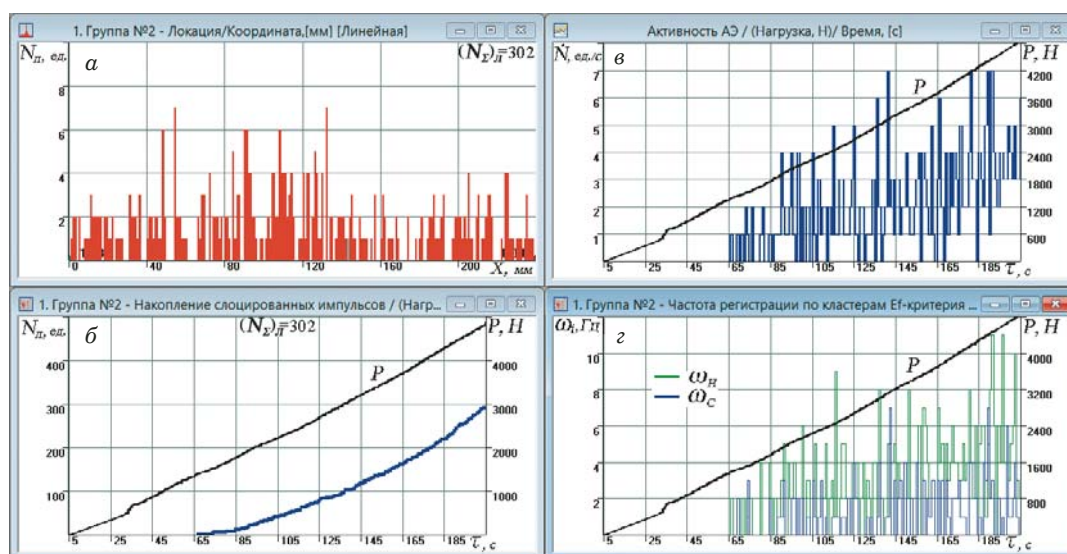


Рис. 2. Распределение АЭ событий в зоне локации (а), график их накопления (б), активность регистрации (в) и частота регистрации импульсов в кластерах Н и С (г) на первой стадии ($\tau_1 = 65 - 205$ с) нагружения при повышении уровня растягивающей деформации от 0,15 до 0,54 % в интервале $\Delta P_1 = 1400 - 4900$ Н

Fig. 2. Distribution of AE events in the zone of location (a), their accumulation (b), registration activity (c) and frequency of pulse registration in clusters H and C (d) at the first loading stage ($\tau_1 = 65 - 205$ sec) with increasing level of tensile deformation from 0.15 to 0.54% in the range $\Delta P_1 = 1400 - 4900$ N

Как следует из рис. 2, а, на первой стадии испытания τ_1 при повышении уровня растягивающей нагрузки в интервале $\Delta P_1 = 1400 - 4900$ Н наблюдалось достаточно равномерное распределение событий АЭ в зоне локации исследуемого

образца, отражающее рассеянное накопление повреждений в структуре композитного материала. Плотность локации событий АЭ колебалась в пределах 1 – 7 ед./мм. Первые локационные импульсы были зарегистрированы на 65 с испыта-

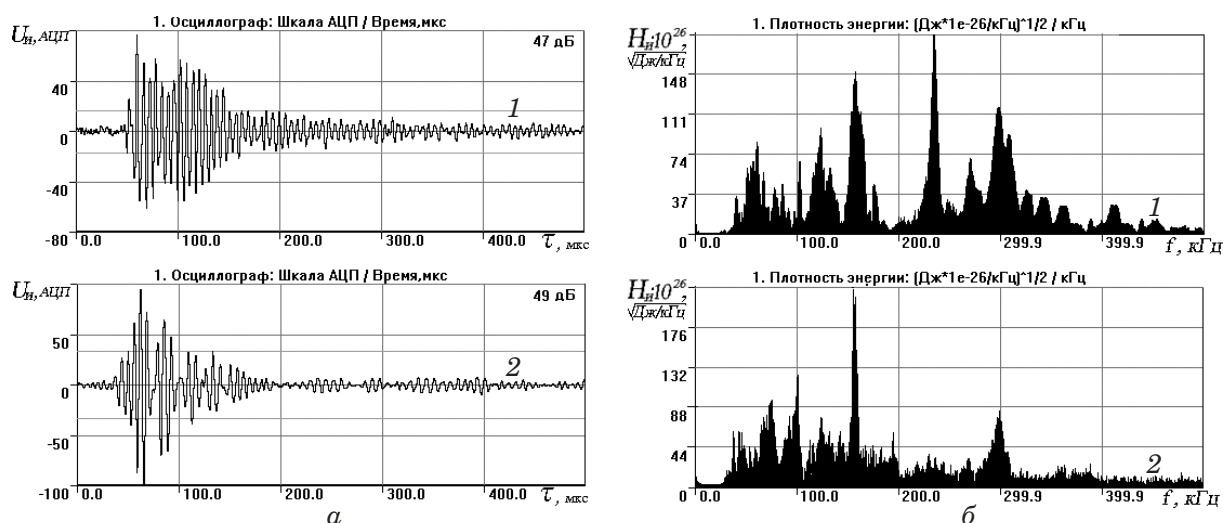


Рис. 3. Типичные формы (а) и спектры (б) импульсов, регистрируемых на первой стадии нагружения ($\tau_1 = 65 - 205$ с) при повышении уровня растягивающей деформации в интервале $\Delta\epsilon_1 = 0,15 - 0,54$ % в результате локального нарушения адгезии связующего на границе скрепления с армирующими волокнами (1) и образования микротрещин в структуре матрицы (2)

Fig. 3. Typical shapes (a) and spectra (b) of the pulses recorded at the first loading stage ($\tau_1 = 65 - 205$ sec) at an increasing level of tensile deformation in the range $\Delta\epsilon_1 = 0.15 - 0.54\%$ resulting from a local violation of binder adhesion at the interface with reinforcing fibers (1) and due to formation of micro-cracks in the matrix structure (2)

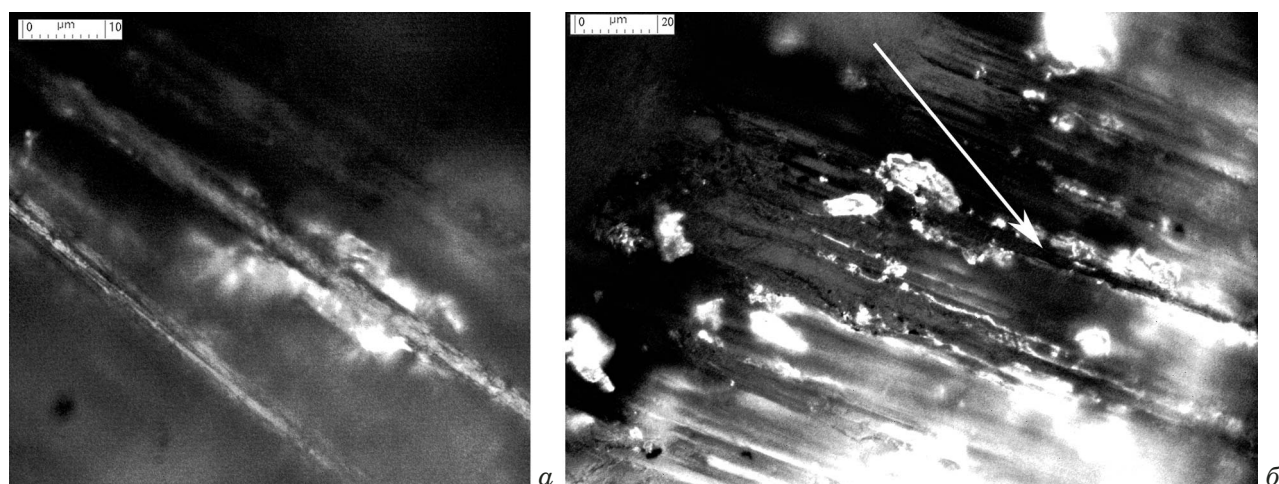


Рис. 4. Виды локального нарушения адгезии связующего на границе скрепления с армирующим волокном при его растяжении (а) и зарождения первых микротрещин в структуре матрицы (б) на первой стадии нагружения

Fig. 4. Local violation of binder adhesion at the interface with reinforcing fibers (a) and formation of micro-cracks in the matrix structure (b) at the first stage of loading

ния при уровне растягивающей нагрузки свыше 700 Н. Из рис. 2, б и в видно, что в период τ_1 суммарное количество накопленных АЭ событий не превышало $(N_{\Sigma})_1 = 302$ ед., а максимальная активность АЭ изменялась от $\dot{N} = 2$ ед./с в момент начала регистрации событий до $\dot{N} = 10 - 11$ ед./с в конце рассматриваемого интервала (190 – 205 с мониторинга). Средний уровень активности регистрации событий в период $\tau_1 = 65 - 205$ с мониторинга не превышал $\dot{N}_1 = 2,16$ ед./с. Синхронно с активностью АЭ, как следует из сопоставления рис. 2, в и г, изменялась частота регистрации импульсов в энергетических кластерах,

максимальный уровень которой в период τ_1 в нижнем кластере $\omega_H = 13$ Гц практически вдвое превышал частоту регистрации в среднем кластере $\omega_C = 7$ Гц. Поэтому основной массив импульсов составляли сигналы, относящиеся к нижнему энергетическому кластеру, весовое содержание которых, как следует из рис. 1, u, колебалось в пределах $W_H = 70 - 75$ %. Соответственно, изменялось весовое содержание импульсов в кластере С — $W_C = 25 - 30$ % в этот период эксперимента.

На рис. 1, г – е отражена динамика изменения основных параметров регистрируемых им-

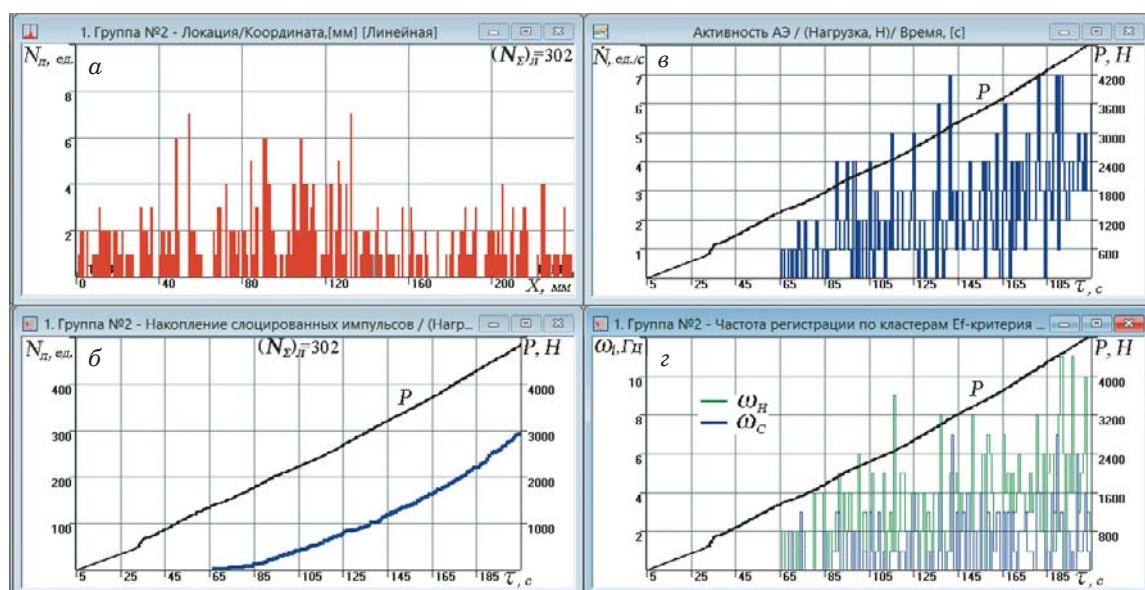


Рис. 5. Распределение АЭ событий в зоне локации (а), график их накопления (б), активность регистрации АЭ событий (в) и частота регистрации импульсов в кластерах Н, С, В (г) на второй стадии нагружения ($t_2 = 205 - 327$ с) при повышении уровня растягивающей деформации от 0,54 до 0,9 % в интервале $\Delta P_2 = 4900 - 9100$ Н

Fig. 5. Distribution of AE events in the zone of location (a), their accumulation (b), registration activity (c) and frequency of pulse registration in clusters L, M, H (d) at the second stage of loading ($t_2 = 205 - 327$ sec) at increasing level of tensile deformation from 0.54 to 0.9% in the range $\Delta P_2 = 4900 - 9100$ N

пульсов в период $t_1 = 65 - 205$ с нагружения при повышении уровня растягивающей деформации от 0,15 до 0,54 % в интервале $\Delta P_1 = 1400 - 4900$ Н. При этом уровни максимальной амплитуды $u_m = 75 - 82$ дБ, относительной энергии $E_{\text{и}} = 105 - 110$ дБ и длительности отдельных импульсов $t_{\text{и}} = 1300 - 1500$ мкс. Основной массив составляли сигналы АЭ с амплитудой $u_m = 40 - 60$ дБ, относительной энергией $E_{\text{и}} = 70 - 90$ дБ и длительностью $t_{\text{и}} \leq 300$ мкс.

На рис. 3 приведены типичные формы и спектры импульсов, регистрируемых в начальный период $t_1 = 65 - 205$ с нагружения образца.

На первой стадии нагружения t_1 основное накопление рассеянных повреждений в пакете ламината от действия растягивающей нагрузки происходит в результате распрямления армирующих волокон, сопровождающегося локальным нарушением адгезии на границе их скрепления со связующим и зарождением микротрещин в структуре матрицы. На рис. 4 показаны моменты локального нарушения адгезии и зарождения первых трещин в слое ламината при повышении уровня растягивающей деформации от 0,15 до 0,54 % при повышении нагрузки от 1400 до 4900 Н, составляющей 41 % от предельного уровня $P_B = 11880$ Н.

Вторая стадия нагружения характеризуется заметным ростом накопления АЭ событий и активности их регистрации, уровень которых, как следует из рис. 1, б, в период $t_2 = 205 - 327$ с мониторинга при повышении растягивающего уси-

лия до $P_2 = 9100$ Н соответственно составил $(N_{\Sigma})_{\text{л}} = 1087$ ед. и $\dot{N}_2 = 8,9$ ед./с, т.е. в четыре раза превысил активность АЭ на первой стадии нагружения. На рис. 5 представлено распределение регистрируемых событий АЭ в зоне локации образца, их накопление и активность регистрации в интервале t_2 , а также частоты регистрации импульсов в кластерах Н, С и В.

Основная локация АЭ событий на второй стадии нагружения наблюдалась в центральной области образца (см. рис. 5, а), где их максимальная плотность достигала $N_{\text{л}} = 34$ ед./мм. Как видно из рис. 5, б, накопление АЭ событий на протяжении всего периода t_2 происходило достаточно равномерно. Максимальная активность их регистрации постепенно возрастала от $\dot{N} = 10 - 15$ ед./с в начале до $\dot{N} = 20 - 24$ ед./с в конце периода t_2 . При этом синхронно изменялась и частота регистрации локационных импульсов в энергетических кластерах, показанная на рис. 5, г. Наибольшую частоту регистрации, достигающую $\omega_C = 15$ Гц, имели локационные импульсы, относящиеся к кластеру С, тогда как частота регистрации низкоэнергетических локационных импульсов в кластере Н не превышала $\omega_H = 12$ Гц (см. рис. 5, г). Наблюдались отдельные высокоэнергетические импульсы, относящиеся к кластеру В. В рассматриваемый период кардинально меняется характер распределения импульсов в энергетических кластерах: резко возрастает накопление локационных импульсов в среднем кластере и синхронно снижается в

нижнем. Если в начальный период второй стадии уровни $W_H = 71\%$ и $W_C = 29\%$, то в конце они приблизились к 50% (см. рис. 1, *u*), т.е. динамика изменения весового содержания локационных импульсов свидетельствует о начале интенсивного разрушения пакета ламината на мезоуровне. Рис. 1, *z* – *e*, отражающие динамику изменения основных параметров регистрируемых импульсов в период τ_2 , также свидетельствуют об этой тенденции. Возрастают максимальный и средний уровни относительной энергии, амплитуды и длительности регистрируемых импульсов. Максимальные значения этих параметров повышаются соответственно до $E_H = 120 - 135$ дБ, $u_m = 90 - 110$ дБ, $t_H = 4000 - 7000$ мкс. При этом основной массив составляют сигналы АЭ с уровнями $u_m = 40 - 80$ дБ, относительной энергии $E_H = 70 - 100$ дБ и длительности $t_H = 100 - 750$ мкс. Наряду с ранее рассмотренными

импульсами 1 и 2 (см. рис. 3) в интервале τ_2 массово регистрировали новые типы импульсов, формы и спектры которых показаны на рис. 6.

Дальнейшее повышение уровня растягивающей деформации ε_1 в центральной зоне образца от $0,54$ до $0,9\%$ на второй стадии нагружения вызвало эволюцию образовавшихся на первой стадии повреждений: их укрупнение и слияние. При этом разрушения ламината возникали уже на мезомасштабном уровне в виде трещин различной направленности в матрицах слоев, отслаивания связующего от армирующих волокон, их разрыва и выдергивания. На рис. 7 представлены типичные повреждения в матрицах слоев ламината при повышении растягивающей деформации до $\varepsilon_1 = 0,9\%$ при нагрузке $P_2 = 9100$ Н, составляющей 77% от предельной $P_B = 11880$ Н.

На третьей стадии нагружения $\tau_3 = 327 - 391$ уровень растягивающего усилия повысился на

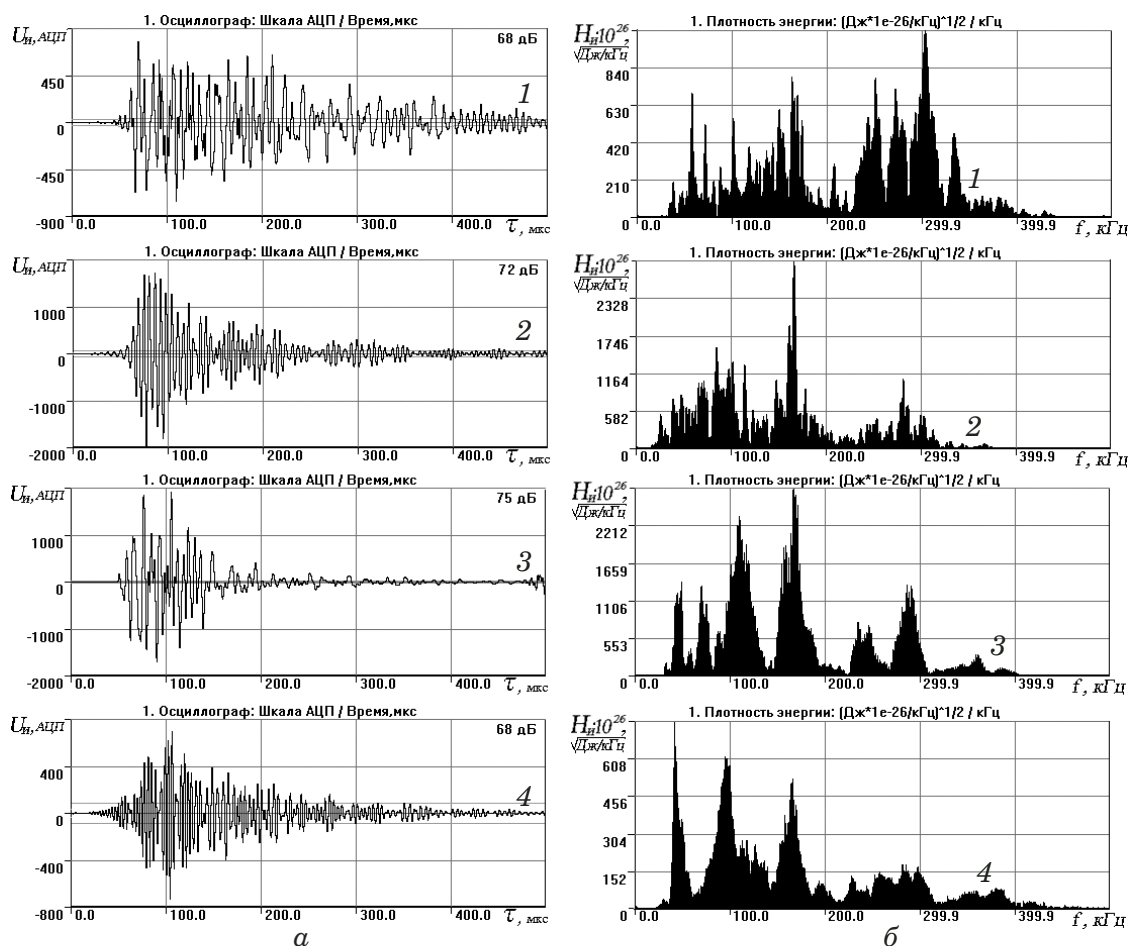


Рис. 6. Типичные формы (*a*) и спектры (*b*) импульсов, регистрируемых на второй стадии нагружения ($\tau_2 = 205 - 327$ с) при повышении уровня растягивающей деформации в интервале $\Delta\varepsilon_1 = 0,54 - 0,9\%$ в результате отслаивания связующего от волокон (1), образования трещин различной направленности в матрицах слоев (2), разрыва армирующих волокон (3) и их выдергивания из связующего (4)

Fig. 6. Typical shapes (*a*) and spectra (*b*) of the location pulses recorded at the second loading stage ($\tau_2 = 205 - 327$ sec) at increasing level of tensile deformation in the range $\Delta\varepsilon_1 = 0.54 - 0.9\%$. Resulting from peeling of the binder from the fibers (1), formation of multi-directional cracks in the matrices of layers (2), breakage of the reinforcing fibers (3), and their pulling out of the binder (4)

$\Delta P = 2300$ Н — до $P_3 = 11\,400$ Н, а длительность нагружения сократилась на $\Delta \tau_3 = 64$ с — по сравнению предыдущим периодом τ_2 практически вдвое. При этом, как следует из рис. 1, б, в, по сравнению с предыдущим периодом накопление АЭ событий испытания возросло более чем в два раза, а средний уровень активности регистрации за период τ_3 повысился в четыре раза и составил $\bar{N}_3 = \text{tg}(\tau_3) = (N_{\Sigma})_3 / \Delta \tau_3 = 2235 / 64 = 34,9$ ед./с.

На рис. 8 приведены графики распределения АЭ событий в зоне локации образца, их накопления, активности регистрации в период τ_3 , а также показана динамика изменения частоты регистрации импульсов в кластерах Н, С и В. Практически 90 % локаций всех АЭ событий регистрировали в центральной области образца, где максимальная их плотность $N_{\text{л}} = 70$ ед./мм (см. рис. 8, а).

Как видно из рис. 8, в, г, активность регистрации АЭ событий и частота регистрации импульсов в энергетических кластерах изменялась в течение периода τ_3 достаточно синхронно. Наибольшую частоту регистрации $\omega_{\text{С}} = 80$ Гц имели импульсы среднего энергетического уровня, вдвое меньшую частоту, не превышающую $\omega_{\text{Н}} = 45$ Гц, — импульсы, относящиеся к кластеру Н. В течение всего периода τ_3 отмечались также сигналы АЭ верхнего энергетического уровня, частота регистрации которых $\omega_{\text{В}} = 1 - 2$ Гц. В интервале τ_3 при повышении уровня наибольших растягивающих деформаций в цен-

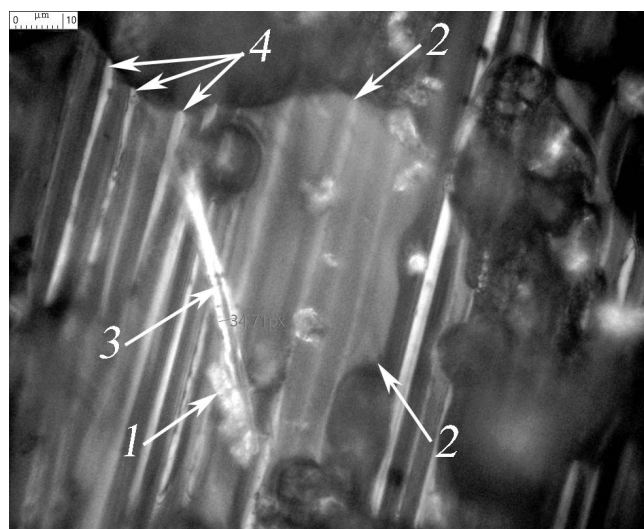


Рис. 7. Типичные повреждения в матрице слоев ламината: отслаивание связующего (1); образование трещин различной направленности (2); выдергивание из связующего армирующих волокон (3) и их разрыв (4) на второй стадии нагружения

Fig. 7. Typical damage to the matrix of the laminate layers: Peeling of the binder (1), formation of multi-directional cracks in the matrix of layers (2), pulling out of the reinforcing fibers from the binder (3) and their breakage (4) at the second stage of loading

тральной области образца до $\varepsilon_1 = 1,09$ % наблюдался стабильный рост весового содержания локационных импульсов в кластере С и синхронное снижение — в кластере Н соответственно до

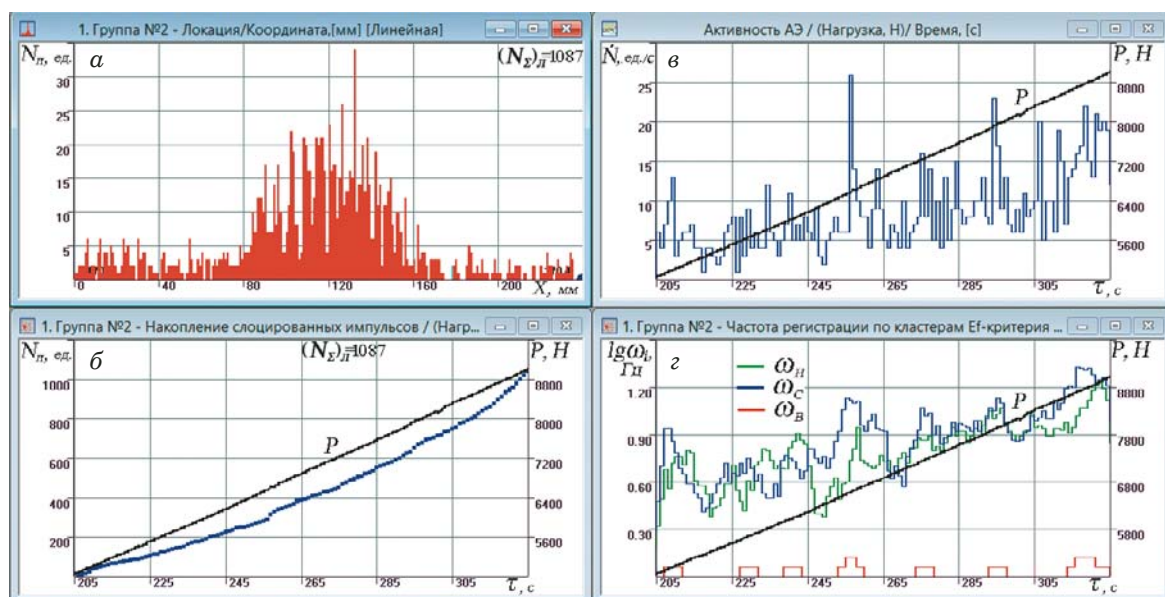


Рис. 8. Распределение АЭ событий в зоне локации (а), график их накопления (б), активность регистрации АЭ событий (в) и частота регистрации импульсов в кластерах Н, С, В (г) на третьей стадии нагружения ($\tau_3 = 327 - 391$ с) при повышении уровня растягивающей деформации от 0,9 до 1,09 % в интервале $\Delta P_3 = 9100 - 11\,400$ Н

Fig. 8. Distribution of AE events in the area of location (a), their accumulation graph (b), activity of registration (c) and frequency of registration of the pulses (d) in clusters L, M, H at the third stage of loading ($\tau_3 = 327 - 391$ sec) at increasing level of tensile deformation from 0.9 to 1.09% in the range $\Delta P_3 = 9100 - 11,400$ N

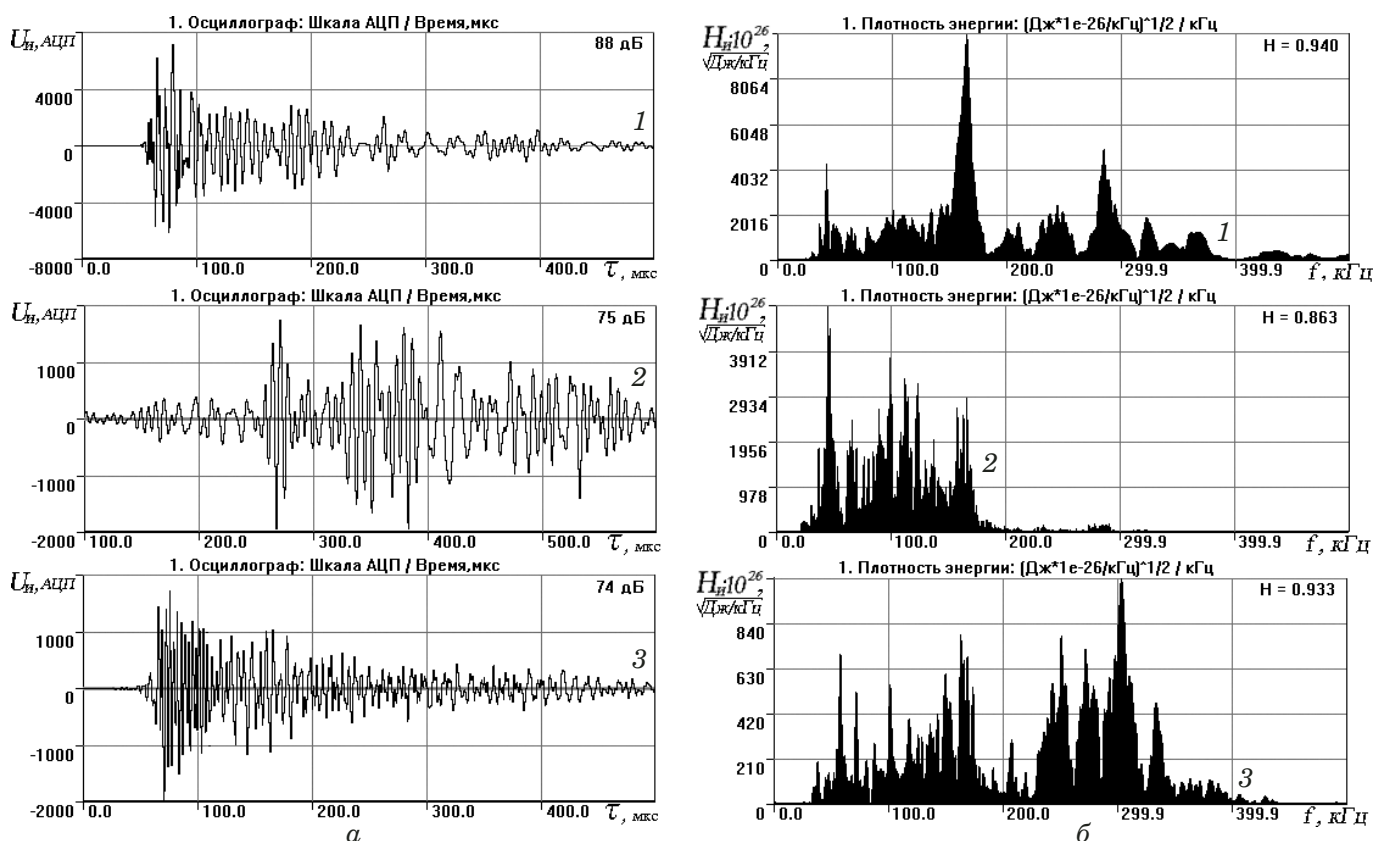


Рис. 9. Формы волн (а) и спектров (б) импульсов, регистрируемые на третьей стадии нагружения ($\tau_3 = 327 - 391$ с) при повышении уровня растягивающей деформации в интервале $\varepsilon_1 = 0,9 - 1,09\%$ в результате массового разрыва волокон (1), их выдергивания из связующего (2) и локального нарушения межслоевой адгезии (3)

Fig. 9. Typical shapes (a) and spectra (b) of the pulses, recorded at the third loading stage ($\tau_3 = 327 - 391$ sec) at increasing level of tensile deformation in the range $\varepsilon_1 = 0.9 - 1.09\%$, as a result of large scale breakage of fibers (1), their pulling out from the binder (2) and local violation of interlayer adhesion (3)

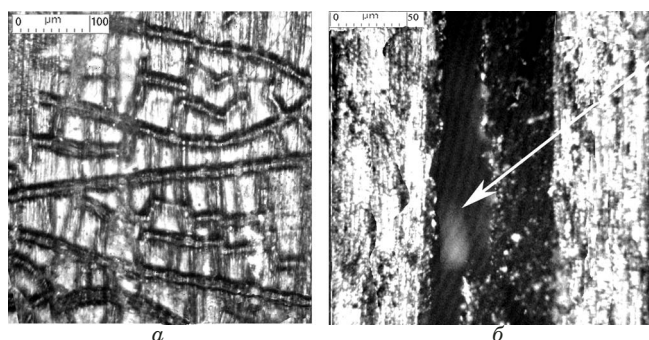


Рис. 10. Виды разрушения на третьей стадии нагружения образца: образование сетки трещин в слоях ламината с массовым разрывом и выдергиванием армирующих волокон (а); локальное нарушение межслоевой адгезии (б)

Fig. 10. Fracture types at the third stage of specimen loading: formation of a net of cracks in the laminate layers with a large scale breakage of reinforcing fibers and their pulling out (a), local violation of interlayer adhesion (b)

уровней $W_C = 60\%$ и $W_H = 39\%$ (см. рис. 1, u). Такая динамика изменения весового содержания импульсов в энергетических кластерах С и Н отражает процесс интенсивного разрушения пакета

та однонаправленного ламината на мезомасштабном уровне.

Из рис. 1, z – e видна динамика изменения основных параметров регистрируемых импульсов в период τ_3 — рост максимальных и средних значений относительной энергии, амплитуды и длительности регистрируемых импульсов. Максимальные значения этих параметров соответственно достигали: $E_n = 130$ дБ; $u_m = 100 - 105$ дБ; $t_n = 5000$ мкс. При этом основной массив составляли импульсы, имеющие максимальную амплитуду $u_m = 50 - 80$ дБ, относительную энергию $E_n = 80 - 100$ дБ и длительность $t_n = 100 - 1500$ мкс.

Наряду с импульсами АЭ, регистрируемыми на предыдущих стадиях нагружения образца (см. рис. 3 и 6), на третьей стадии мониторинга наблюдали новые типы локационных импульсов, энергетические параметры, формы и спектры которых (рис. 9) свидетельствуют о переходе разрушений в пакете ламината от мезо- к макромасштабному уровню.

Полученные повреждения структуры слоев ламината на предыдущих стадиях нагружения при повышении растягивающей нагрузки

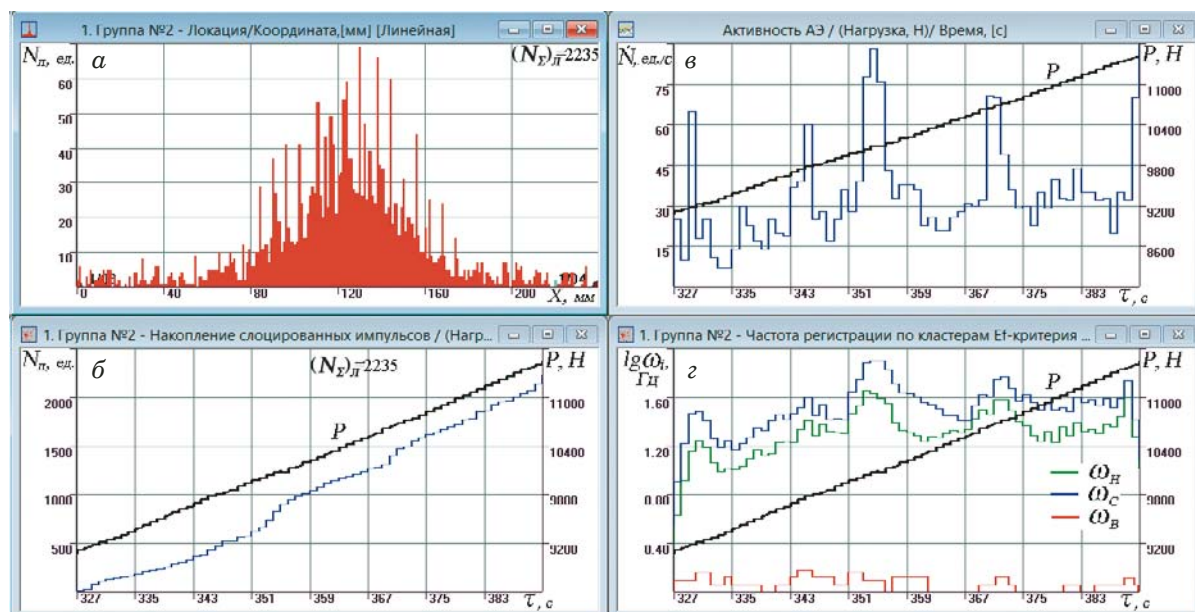


Рис. 11. Распределение АЭ событий в зоне локации образца (а), график их накопления (б), активность регистрации (в) и частота регистрации импульсов в кластерах Н, С и В (г) на четвертой стадии ($\tau_4 = 391 - 415$ с) нагружения при повышении растягивающей деформации от 1,09 до 1,19 % в интервале $\Delta P_4 = 11\,400 - 11\,960$ Н

Fig. 11. Distribution of AE events in the zone of location (a), their accumulation (b), registration activity (c) and frequency of pulse registration in clusters L, M, H (d) at the fourth loading stage ($\tau_4 = 391 - 415$ sec) at increasing level of tensile deformation from 1.09 to 1.19% in the range $\Delta P_4 = 11,400 - 11,960$ N

в период τ_3 привели к возникновению разрушений на всех структурных уровнях в виде образования сетки трещин в слоях ламината, массовому разрыву и выдергиванию волокон, локальному нарушению межслоевой адгезии. На рис. 10 представлены типичные виды разрушения структуры композита на третьей стадии нагружения образца.

На последней стадии нагружения в период $\tau_4 = 391 - 415$ с испытания при повышении усилия до предельной нагрузки $P_v = 11\,880$ Н накопление АЭ событий и активность их регистрации достигли своего максимума и соответственно составляли: $(N_{\Sigma})_4 = 3948$ ед. и $\dot{N}_4 = \text{tg}(\alpha_4) = (N_{\Sigma})_4 / \Delta \tau_4 = 3948 / 24 = 164,5$ ед./с (см. рис. 1, б, в). На рис. 11 показано распределение регистрируемых событий АЭ в зоне локации образца, их накопление и активность регистрации в период τ_4 , а также частота регистрации импульсов в кластерах Н, С и В.

Всего в период $\tau_4 = 391 - 415$ с испытания при повышении уровня растягивающей деформации до $\varepsilon_1 = 1,19$ % при $P_v = 11\,880$ Н слочировано $(N_{\Sigma})_4 = 3948$ событий АЭ. Приведенная на рис. 11, а картина их распределения свидетельствует о том, что более 90 % локаций всех событий АЭ происходило в центральной области образца, где максимальная плотность событий достигала $N_{\Sigma} = 180$ ед./мм. Кривая накопления АЭ событий на рис. 11, б может быть разбита на три линейных участка (391 – 396 с; 396 – 409 с и

409 – 415 с), на которых активность регистрации АЭ событий заметно отличалась. Максимальную активность АЭ N , равную 260 ед./с и 320 ед./с, регистрировали соответственно в первый и третий периоды четвертой стадии нагружения. Синхронно изменялась и частота регистрации локационных импульсов в энергетических кластерах Н, С и В (см. рис. 11, г). В период 409 – 415 с нагружения при повышении уровня наибольших растягивающих деформаций до $\varepsilon_1 = 1,19$ % частота регистрации импульсов в энергетических кластерах достигала максимальных значений: $\omega_H = 112$ Гц; $\omega_C = 324$ Гц; $\omega_B = 5$ Гц. В результате этого в момент потери образцом несущей способности на 415 с испытания весовое содержание импульсов в кластере С повысилось до $W_C = 70$ %, а в кластере Н снизилось до $W_C = 29$ % (см. рис. 1, u). Несмотря на рост частоты регистрации высокоэнергетических сигналов до $\omega_B = 5$ Гц, весовое содержание накопленных импульсов в кластере В не превышало $W_B = 1$ %.

Рис. 1, г – е, отражают динамику изменения основных параметров регистрируемых импульсов в последний период $\Delta \tau_4 = 409 - 415$ с нагружения образца — резко возрастали максимальный и средний уровни относительной энергии, амплитуды и длительности сигналов АЭ. Максимальные значения этих параметров в отдельных высокоэнергетических импульсах соответственно достигали $E_{\text{и}} = 135 - 145$ дБ, $u_m = 100 - 110$ дБ, $t_{\text{и}} = 9000 - 13\,000$ мкс. Основным массив сигналов

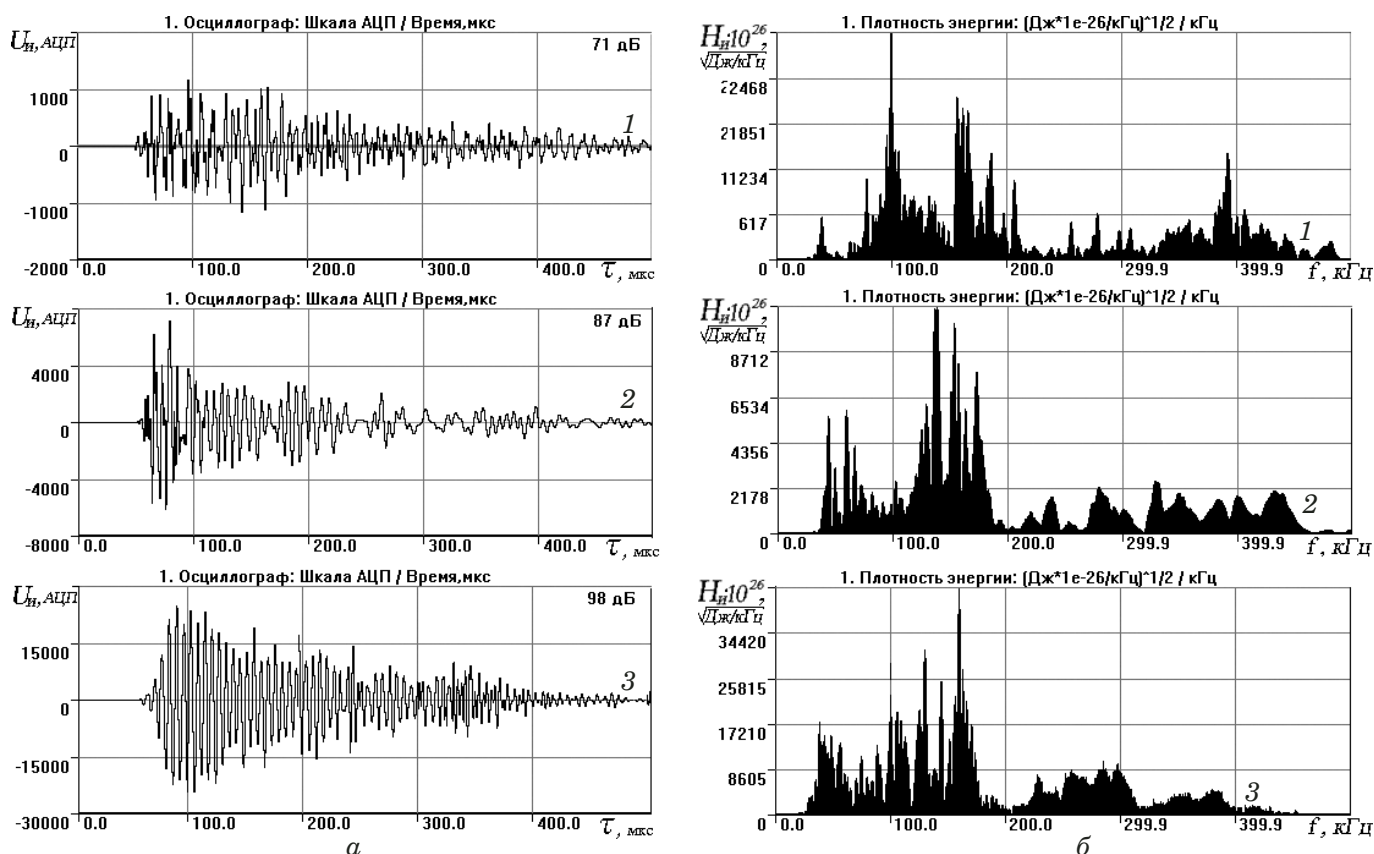


Рис. 12. Формы (а) и спектры (б) импульсов АЭ, регистрируемых на четвертой стадии нагружения ($t_4 = 409 - 415$ с) при повышении уровня растягивающей деформации от 1,09 до 1,19 %, генерируемых процессами макромасштабного разрушения в результате расслоения пакета ламината (1), образования магистральных трещин (2) и разрыва слоев (3)

Fig. 12. Typical shapes (a) and spectra (b) of AE pulses recorded at the fourth loading stage ($t_4 = 409 - 415$ sec) at increasing level of tensile deformation in the range $\Delta\epsilon_1 = 1.09 - 1.19\%$ attributed to the processes of macro-scale fracture due to delamination of the package (1), formation the main cracks (2) and breakage of the layers (3)

АЭ имел следующие параметры: $u_m = 40 - 90$ дБ, $E_n = 70 - 120$ дБ, $t_n = 100 - 5000$ мкс. Наряду с импульсами, регистрируемыми на предыдущих стадиях нагружения, в заключительный период $\Delta t_4 = 409 - 415$ с нагружения отмечали новые типы локационных импульсов, формы и спектры которых приведены на рис. 12.

На рис. 13 представлена картина разрушения пакета ламината по толщине образца, зарегистрированная на 415 с испытания при повышении уровня растягивающей деформации до $\epsilon_1 = 1,19\%$ при $P_b = 11\,880$ Н. Разрушение сопровождается межслоевым расслаиванием (1), образованием магистральных трещин (2), проходящих по всей толщине слоев, и их разрывом (3).

В заключение анализа АЭ данных разделим все зарегистрированные на стадиях нагружения образца локационные импульсы на кластеры, сигналы в которых имеют похожие спектры распределения плотности энергии и относятся к аналогичным или близким по природе источников АЭ событиям. Разделение проведем в поле параметров $\eta - \Delta f$, где коэффициент парциальной плотности энергии $\eta = H_{fm}/H_{fr}$, отражает соотно-

шение пиковой плотности энергии H_{fm} , регистрируемой на частоте f_m , к плотности энергии H_{fr} , выделяемой на резонансной частоте $f_R = 160$ кГц применяемых преобразователей R15-а в полосе пропускания $\Delta f = 30 - 500$ кГц цифрового фильтра АЭ системы A-Line 32D. На рис. 14 показаны сформировавшиеся в поле дескрипторов $\eta - \Delta f$ кластеры I – V локационных импульсов, характерные для определенных типов источников АЭ сигналов.

Эти кластеры отражают характерные области частот спектра, на которых выделяется максимум энергии регистрируемых импульсов. Коэффициент парциальной энергии $\eta \leq 1$ свидетельствует о том, что максимальное значение выделяемой энергии происходит на резонансной частоте применяемых ПАЭ. При $\eta > 1$ пиковая частота, на которой регистрируется максимум энергии спектра, отличается от резонансной. Уровень парциального коэффициента показывает, во сколько раз энергия, выделяемая на пиковой частоте регистрируемого импульса, превышает энергию, выделяемую на резонансной частоте применяемого преобразователя АЭ.

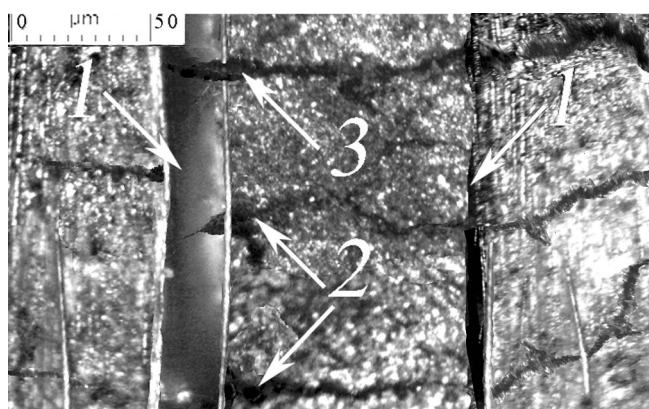


Рис. 13. Картина разрушения пакета ламината, зарегистрированная на 415 с испытания при повышении уровня растягивающей деформации до $\varepsilon_1 = 1,19\%$ при $P_B = 11\,880$ Н, сопровождающегося межслоевым расслаиванием (1), образованием магистральных трещин (2) и разрывом слоев (3)

Fig. 13. The pattern of the laminate package fracture registered at 415 s of testing at increasing level of tensile deformation up to $\varepsilon_1 = 1.19\%$ at $P_H = 11\,880$ N, accompanied by delamination of the package (1), formation the main cracks (2) and breakage of the layers (3)

Кластер I включает импульсы, генерируемые при вытягивании образца из захватов нагружающего стенда и вырывании волокон из связующего. Кластер II характерен для сигналов, возникающих в процессе нарушения адгезии клеевого соединения и расслаивания пакета ламината на стадиях $\tau_3, \dots, \tau_4$ нагружения образца. К кластеру III относятся импульсы, возникающие при образовании трещин в пакете ламината, разрыве волокон, образовании магистральных трещин и разрыве слоев. Кластер IV включает импульсы, генерируемые на стадии τ_1 нагружения образца в результате распрямления армирующих волокон и локального нарушения адгезии на границе их скрепления со связующим. Кластер V характерен для сигналов, возникающих при отслаивании связующего от армирующих волокон на стадиях $\tau_2, \dots, \tau_4$ нагружения образца.

Необходимо отметить, 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-а с резонансной частотой $f_R = 160$ кГц при полосе пропускания цифрового фильтра $\Delta f = 30 - 500$ кГц с использованием системы A-Line 32D. При использовании ПАЭ с иной резонансной частотой и (или) полосой Δf пропускания цифрового фильтра границы кластеров выделенных источников сигналов и помех в поле дескрипторов $\eta - f$ могут заметно отличаться от приведенных на рис. 14, так же как формы и спектры импульсов, зарегистриро-

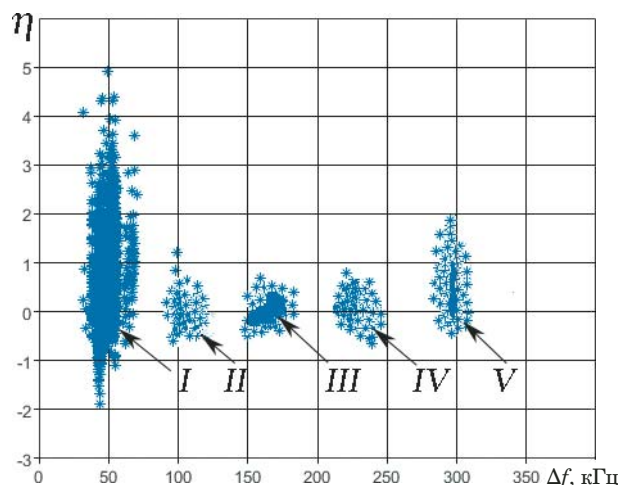


Рис. 14. Кластеры I – V локационных импульсов, зарегистрированных в процессе разрушения пакета однонаправленного ламината, в поле параметров $\eta - \Delta f$

Fig. 14. Clusters I – V of all location pulses registered during fracture of the unidirectional laminate package in the field of parameters $\eta - \Delta f$

ванные с применением резонансных преобразователей R15-а при полосе пропускания цифрового фильтра АЭ системы $\Delta f = 30 - 500$ кГц и показанные на рис. 3, 6, 9 и 12. Такая зависимость подтверждена результатами АЭ мониторинга, полученными с применением широкополосных преобразователей UT-1000 (ПАЭ № 1, 2), усилителей 2-4-6 AST, цифрового фильтра с полосой пропускания сигналов $\Delta f = 50 - 2000$ кГц и системы сбора и обработки АЭ данных PCI-2, использованной для верификации результатов проводимых исследований. На рис. 15 показаны типичные формы и спектры локационных импульсов, регистрируемых широкополосными преобразователями UT-1000 на разных стадиях нагружения образца.

Сравнительный анализ импульсов, генерируемых одними и теми же источниками излучения, показал, что формы, спектры и энергетические параметры сигналов АЭ существенным образом зависят от амплитудно-частотной характеристики преобразователя, полосы пропускания цифровых фильтров, акустического канала, в том числе удаленности ПАЭ от источника АЭ событий, их энергии, установленного порога дискриминации сигналов u_{th} , а также от частоты дискретизации АЭ системы.

Обсуждение результатов

Применение АЭ диагностики и синхронной видеорегистрации при испытаниях композитных образцов на растяжение позволило осуществить поэтапный мониторинг процесса накопления повреждений в структуре однонаправленного ламината и идентифицировать локационные импуль-

Параметры стадий нагружения образца, регистрируемых событий и импульсов АЭ

Parameters of the stages of the specimen loading, recorded events and AE pulses

Параметр	Стадии i			
	1	2	3	4
τ , с	65 – 205	205 – 327	327 – 391	391 – 415
P_i/P_B , %	11,7 – 41	41 – 77	77 – 96	96 – 100,7
ε_1 , %	0,15 – 0,54	0,54 – 0,9	0,9 – 1,09	1,09 – 1,19
N_Σ , ед.	302	1087	2235	3948
$\dot{N}$, ед./с	2,14	8,9	34,9	164,5
ω_H , Гц	13	12	45	112
ω_C , Гц	7	15	80	324
ω_B , Гц	—	—	1 – 2	5
W_H , %	75 – 70	71 – 50	50 – 39	39 – 29
W_C , %	25 – 30	29 – 50	50 – 60	60 – 70
W_B , %	—	—	1	1
E_n , дБ	70 – 90	70 – 100	80 – 110	80 – 120
u_m , дБ	40 – 60	40 – 80	50 – 85	50 – 90
t_n , с	50 – 300	100 – 750	100 – 1500	100 – 5000
Кластеры спектров	III, IV	I, ..., IV	I, ..., V	I, ..., V

сы, характерные для процессов разрушения пакета однонаправленного ламината $[0^\circ]_{4S}$ на микро-, мезо- и макромасштабном уровнях. Процесс накопления повреждений и разрушения структуры ПКМ при испытании образцов однонаправленного ламината на растяжение был разделен на четыре характерные стадии ($\tau_1, \dots, \tau_4$), каждая из которых отражает степень повреждения и разрушения структурных связей в пакете однонаправленного ламината на микро-, мезо- и макромасштабном уровнях. Исходя из полученных экспериментальных данных, в таблице приведены значения параметров для выделенных стадий накопления повреждений и разрушения пакета однонаправленного ламината от действия растягивающей деформации — весовое и частотное распределение локационных импульсов в энергетических кластерах, их основные энергетические и временные характеристики, а также кластерное разделение сигналов по спектральной плотности энергии.

Как следует из анализа результатов АЭ мониторинга разрушения однонаправленного ламината, наиболее информативными параметрами, позволяющими получить наглядное представление о накоплении повреждений в пакете ламината на микро-, мезо- и макромасштабном уровнях, являются частота регистрации ω_i и весового содержания W_i локационных импульсов в энергетических кластерах H, C, B. Динамика изменения этих параметров, показанная на рис. 1, 3, 4, наглядно отражает тренды накопления повреждений и дает представление об интенсивности

происходящих разрушений в пакете однонаправленного ламината на всех структурных уровнях.

На фотоизображениях видеосъемки разрушений композитного материала, приведенных на рис. 4, 7, 9, 13, отражены типичные моменты повреждений структурных связей однонаправленного ламината на микро-, мезо- и макромасштабном уровнях, возникающие на стадиях $\tau_1, \dots, \tau_4$ нагружения образца. Мониторинг процесса накопления повреждений и разрушения структуры ПКМ с применением синхронной видео- и акустико-эмиссионной регистрации АЭ событий дал возможность выявить основные типы разрушения структуры в пакете ламината на выделенных стадиях нагружения образца и идентифицировать генерируемые при этом локационные импульсы, их энергетические и временные параметры, форму и спектр. В ходе повышения уровня растягивающей деформации на стадиях $\tau_1, \dots, \tau_4$ нагружения образца регистрировали следующие типы локационных импульсов.

1. Сигналы, относящиеся к нижнему энергетическому кластеру H, соответствующие разрушению структурных связей на макромасштабном уровне. Они возникают в результате процесса локального отслаивания связующего и образования микротрещин в хрупкой структуре матрицы слоев вследствие распрямления армирующих волокон на первой стадии нагружения образца ($\tau_1 = 65 - 205$ с) при превышении уровня наибольших деформаций в зоне минимального сечения образца $\varepsilon_1 = 0,15$ %.

2. Сигналы, относящиеся к среднему энергетическому кластеру С, на мезомасштабном уровне, генерируемые процессами образования трещин различной направленности в матрицах слоев ламината в результате отслаивания связующего от армирующих волокон, а также их разрыва и выдергивания. Наибольшую активность сигналов второго типа регистрировали на стадиях $\tau_2, \dots, \tau_4$ при превышении уровня наибольших деформаций в области центрального выреза $\varepsilon_1 = 0,54\%$.

3. Сигналы, относящиеся к верхнему энергетическому кластеру В, соответствующие разрушению структурных связей при макромасштабных разрушениях композитного материала в виде массового разрыва армирующих волокон и их выдергивания, расслаивания пакета ламината, образования магистральных трещин и разрыва слоев. Такие импульсы регистрировали на последних стадиях нагружения образца τ_3, τ_4 при превышении уровня растягивающей деформации $\varepsilon_1 = 0,9\%$. При этом их весовое содержание $W_B \leq 1\%$, а частота регистрации $\omega_B \leq 5$ Гц, что было обусловлено низкой скоростью нагружения образцов, не превышающей 10 мкм/с.

Заключение

Использование разработанных критериальных параметров, методик кластерного и спектрального анализа при акустико-эмиссионной диагностике, осуществляемого синхронно с видеосъемкой накопления повреждений в материале образца при растяжении позволило установить перекрестные связи между процессом разрушения структурных связей в пакете однонаправленного ламината на микро-, мезо- и макромасштабном уровнях, генерируемыми при этом акустическими волнами и регистрируемыми преобразователями АЭ локационными импульсами: их энергией, формой и спектром.

Сопоставление АЭ событий, регистрируемых на стадиях нагружения испытываемого образца, с кадрами видеосъемки и микроструктурными измерениями позволило связать частоту регистрации и весовое накопление локационных импульсов в нижнем, среднем и верхнем энергетических кластерах с происходящими разрушениями пакета однонаправленного ламината на микро-, мезо- и макромасштабном уровнях. Анализ энергетических параметров, формы и спектров локационных импульсов, регистрируемых на стадиях нагружения исследуемых образцов, дал возможность выявить характерные типы сигналов АЭ, генерируемых при отслаивании связующего от армирующих волокон, образовании трещин в матрицах слоев, разрыве волокон, их выдергивании из связующего, расслаивании пакета ламината, образовании магистральных трещин и разрыве слоев.

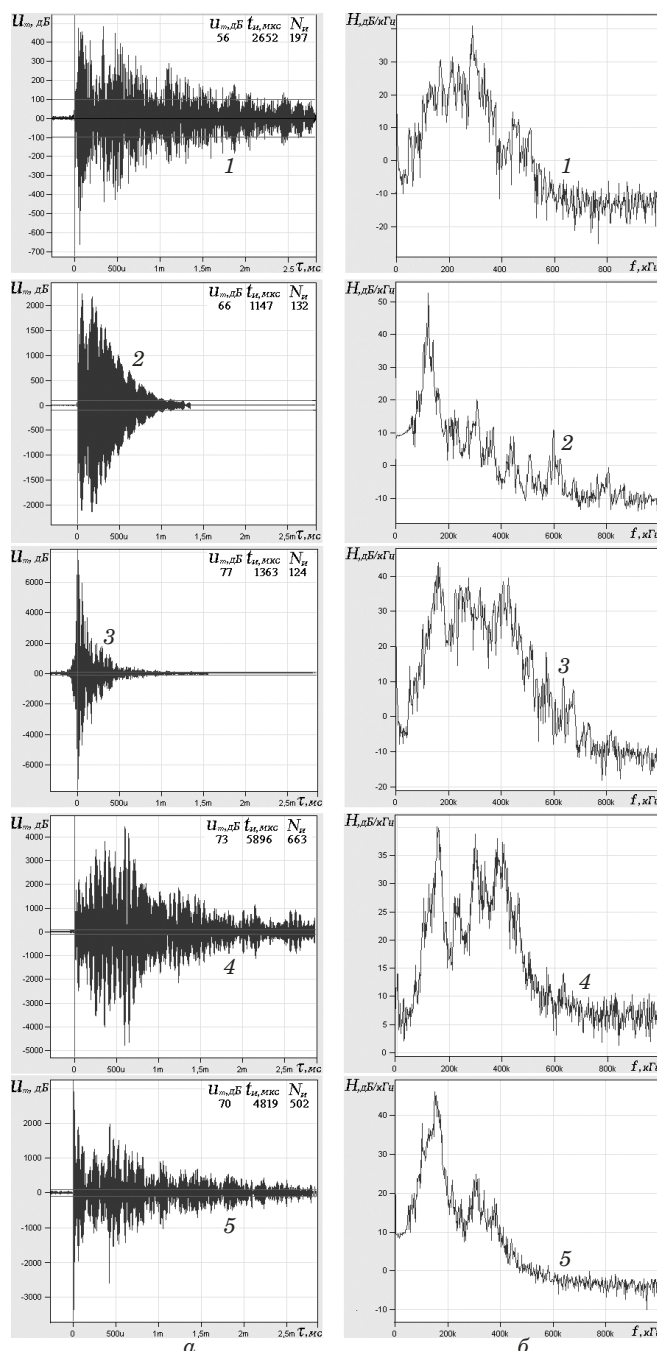


Рис. 15. Формы (а) и спектры (б) локационных импульсов, регистрируемых преобразователями UT-1000 на стадиях нагружения образца, генерируемых процессами отделения связующего (1) от волокон, образования трещин в матрицах слоев (2), разрыва волокон (3), их вырывания из связующего (4), межслоевого расслаивания (5)

Fig. 15. The shapes (a) and spectra (b) of the location pulses recorded by the UT-1000 transducers at the stages of specimen loading, attributed to binder peeling from the fibers (1), formation of cracks in the matrix of layers (2), breakage of the fibers (3), their pulling out from the binder (4), and interlayer delamination (5)

ната, образовании магистральных трещин и разрыве слоев.

Весовые характеристики W_i регистрации импульсов АЭ в кластерах нижнего, среднего и

верхнего энергетических уровней дают информацию о процессе накопления повреждений на микро-, мезо- и макромасштабном уровнях, а частотные параметры ω_i отражают степень воздействия прикладываемой нагрузки на процесс повреждения и разрушения структурных связей конструкционного материала. Комплексное использование частотных ω_i и весовых W_i параметров регистрации локационных импульсов в энергетических кластерах Н, С и В при АЭ диагностике исследуемых элементов конструкций позволяет в режиме реального времени получить более информативную картину накопления повреждения и разрушения конструкционного материала на всех структурных уровнях, а следовательно, повысить достоверность оценки остаточной прочности изделия.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00351).

ЛИТЕРАТУРА

1. Проблемы прочности, техногенной безопасности и конструкционного материаловедения / Под ред. Н. А. Махутова, Ю. Г. Матвиенко, А. Н. Романова. — М.: ЛЕНАНД, 2018. — 720 с.
2. 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.
3. 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.
4. Васильев И. Е., Матвиенко Ю. Г., Панков А. В., Калинин А. Г. Применение методики ранней диагностики повреждений при исследовании авиационной панели / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 6. С. 40 – 56.
5. 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.
6. Матвиенко Ю. Г., Васильев И. Е., Чернов Д. В., Панков В. А. Акустико-эмиссионный мониторинг процесса повреждения опорной стойки в условиях циклического нагружения / Дефектоскопия. 2019. № 8. С. 24 – 33.
7. 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. Vol. 144. P. 206 – 219.
8. Sause M. G. R. Modeling of acoustic emission sources in fiber reinforced composites / Progress in acoustic emission XVIII. JSNDI-23 & III AE. Kyoto. 2016. P. 305 – 310.
9. Pashmforoush F., Khamedi R., Fotouhi M., Hajikhani M., Ahmadi M. Damage classification of sandwich composites using acoustic emission technique and k-means genetic algorithm / J. Nondestr. Eval. 2014. Vol. 33. № 4. P. 481 – 492.
10. 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. Vol. 30. P. 167 – 179.

11. Mahil C., Loo Ch., Sasikumar T., Suresh S. Analysis of failure mode and fracture behavior by using acoustic parameter and artificial neural network / Engineering Research Express. 2019. P. 1 – 15.
12. Crivelli D., Guagliano M., Monici A. Development of an artificial neural network processing technique for the analysis of damage evolution in pultruded composites with acoustic emission. Composite Part B: Engineering. 2014. Vol. 56. January. P. 948 – 959.
13. Li L., Lomov S. V., Yan X. Correlation of acoustic emission with optically observed damage in a glass epoxy woven laminate under tensile loading / Composite Structure. 2015. Vol. 123. P. 45 – 53.
14. 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. Vol. 201. P. 36 – 46.
15. Abderrahim El Mahi, Hajer Daoud, Jean-Luc Rebiere, Isabelle Gimenez, Mohamed Taktak and Mohamed Haddar. Damage mechanisms characterization of flax fibers-reinforced composites with interleaved natural viscoelastic layer using acoustic emission analysis / Journal of Composite Materials. Review. 2019. Vol. 0(0). P. 1 – 15.
16. Mahmoud R. Abusrea, Seung-Wook Han, Kazuo Arakawa, Nak-Sam Choi. Bending strength of CFRP laminated adhesive joints fabricated by vacuum-assisted resin transfer molding / Composites Part B. 2019. Vol. 156. P. 8 – 16.
17. 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.
18. 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.
19. 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. Vol. 25. N 1. P. 140 – 148.
20. Sause M. G. R. Acoustic Emission Signal Propagation in Damaged Composite Structures / Journal of Acoustic Emission. 2013. Vol. 31. № 1. P. 1 – 18.
21. 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. Kyoto. 2016. P. 287 – 292.
22. 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. С. 3 – 21.

REFERENCES

1. Problems of the strength of materials, industrial security and construction materials / Makhutov N. A., Matvienko Yu. G., Romanov A. N., Ed. — Moscow: Lenand, 2018. — 720 p. [in Russian].
2. Matvienko Yu. G., Vasil'ev I. E., Chernov D. V., and Elizarov S. V. Criterion parameters for assessing degradation of composite materials by acoustic emission testing / J. Nondestructive Testing. 2018. Vol. 54. N 12. P. 811 – 819.
3. 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.
4. Vasil'ev I. E., Matvienko Yu. G., Pankov A. V., and Kalinin A. G. The application of the method of early damage diagnostics in the research of the aviation panel / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2019. Vol. 85. N 6. P. 40 – 56 [in Russian].

5. **Matvienko Yu. G., Vasil'ev I. E., Chernov D. V.** Diagnostics of fracture and damage with acoustic emission method / *Priv. Komponenty Mashin*. 2018. N 5. P 13 – 18 [in Russian].
6. **Matvienko Yu. G., Vasil'ev I. E., Chernov D. V., and Pankov A. V.** Acoustic emission monitoring of the process of damage to the support of the strut under cyclic loading / *Defektoskopiya*. 2019. N 8. P 24 – 33 [in Russian].
7. **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. Vol. 144. P 206 – 219.
8. **Sause M. G. R.** Modeling of acoustic emission sources in fiber reinforced composites / *Progress in acoustic emission XVIII. JSNDI-23 & III AE. Kyoto*. 2016. P 305 – 310.
9. **Pashmforoush F., Khamedi R., Fotouhi M., Hajikhani M., Ahmadi M.** Damage classification of sandwich composites using acoustic emission technique and k-means genetic algorithm / *J. Nondestr. Eval.* 2014. Vol. 33. N 4. P 481 – 492.
10. **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. Vol. 30. P 167 – 179.
11. **Mahil C., Loo Ch., Sasikumar T., Suresh S.** Analysis of failure mode and fracture behavior by using acoustic parameter and artificial neural network / *Engineering Research Express*. 2019. P 1 – 15.
12. **Crivelli D., Guagliano M., Monici A.** Development of an artificial neural network processing technique for the analysis of damage evolution in pultruded composites with acoustic emission. *Composite Part B: Engineering*. 2014. Vol. 56. January. P 948 – 959.
13. **Li L., Lomov S. V., Yan X.** Correlation of acoustic emission with optically observed damage in a glass epoxy woven laminate under tensile loading / *Composite Structure*. 2015. Vol. 123. P 45 – 53.
14. **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. Vol. 201. P 36 – 46.
15. **Abderrahim El Mahi, Hajer Daoud, Jean-Luc Rebiere, Isabelle Gimenez, Mohamed Taktak and Mohamed Haddar.** Damage mechanisms characterization of flax fibers-reinforced composites with interleaved natural viscoelastic layer using acoustic emission analysis / *Journal of Composite Materials. Review*. 2019. Vol. 0(0). P 1 – 15.
16. **Mahmoud R. Abusrea, Seung-Wook Han, Kazuo Arakawa, Nak-Sam Choi.** Bending strength of CFRP laminated adhesive joints fabricated by vacuum-assisted resin transfer molding / *Composites Part B*. 2019. Vol. 156. P 8 – 16.
17. **Stepanova L. N., Bataev V. A., Chernova V. V.** Studying the failure of a cfrp sample under static loading by the acoustic-emission and fractography methods / *Nondestructive Testing*. 2017. Vol. 53. N 6. P 422 – 429.
18. **Stepanova L. N., Ramazanov I. S., Chernova V. V.** A procedure for locating acoustic-emission signals during static testing of carbon composite samples / *Nondestructive Testing*. 2015. Vol. 51. N 4. P 227 – 235.
19. **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. Vol. 25. N 1. P 140 – 148.
20. **Sause M. G. R.** Acoustic Emission Signal Propagation in Damaged Composite Structures / *Journal of Acoustic Emission*. 2013. Vol. 31. N 1. P 1 – 18.
21. **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. Kyoto*. 2016. P 287 – 292.
22. **Makhutov N. A., Vasil'ev I. E., Ivanov V. I., Chernov D. V.** Modeling of the unstable dangerous states under formation of a cone granulated glass / *Probl. Bezopasn. Chrezv. Sit.* 2019. N 1. P 3 – 24 [in Russian].