

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ИСПЫТАНИИ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

С. А. НЕДОСЕКА¹, А. Я. НЕДОСЕКА¹, М. А. ШЕВЦОВА², А. Н. ГУРЬЯНОВ¹, А. А. ВАМБОЛЬ²

¹ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». 61070, г. Харьков, ул. Чкалова 17. E-mail: khai@khai.edu

Композиционные материалы, в том числе и на основе нитей углерода, обеспечивающие вместе с необходимой прочностью достаточно большую экономию в весе создаваемой конструкции любой формы и позволяющие реализовать уникальные характеристики при их использовании, находят все более широкое применение при создании конструкций и требуют разработки надежного неразрушающего метода оценки их состояния, в том числе в процессе эксплуатации. В данной работе выполнена оценка возможности применения метода АЭ на базе аппаратуры типа ЕМА для контроля композиционного материала Udo UD CST 150/300 на основе связующего ARALDITE 564. Выполнена проверка локации координат источников АЭ на ненагруженной пластине и образцах, подвергнутых статическому нагружению. Проверена возможность выделения различных стадий нагружения по сигналам АЭ. Показано, что исследуемый композиционный материал является контролепригодным с точки зрения метода АЭ, позволяет определять координаты источников АЭ с достаточно высокой точностью при тестовом прозвучивании и излучает волны АЭ в процессе деформирования и разрушения. При наличии концентраторов можно с достаточной для практики точностью определить их местоположение в процессе нагружения образца. При проведенных АЭ испытаниях образцов на растяжение выделено две разделенные во времени группы событий, первая из которых возникает вскоре после начала нагружения, а вторая непосредственно перед разрушением и в процессе его. Отмечено резкое двукратное повышение уровня непрерывной АЭ при регистрации предразрушающего состояния и момента разрушения. Отмечена принципиальная возможность создания методики контроля композитов с применением АЭ технологии и прогнозированием их состояния после дополнительных исследований с целью четкой отработки критериев, характеризующих разрушение. Библиогр. 8, табл. 1, рис. 7.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, композиционные материалы, стадия нагружения, деформирование, локация координат, предразрушающее состояние, контроль

В последнее время в конструкциях машиностроения все шире применяются композиционные материалы, в том числе и на основе нитей углерода, обеспечивающие вместе с необходимой прочностью достаточно большую экономию в весе создаваемой конструкции любой формы и позволяющие реализовать уникальные характеристики за счет их применения. Поэтому исследование прочности этих материалов, их контроль на всех стадиях создания, контроль состояния готовой конструкции в процессе эксплуатации является важной задачей. В этом случае большое значение может иметь технология оценки состояния материала на основе акустической эмиссии (АЭ технология [1, 2]), показавшая удовлетворительные результаты при оценке состояния конструкций, созданных на основе обычных однородных материалов. Такое применение АЭ является обычной практикой уже в течение многих лет [2–4]. Однако, учитывая неоднородность свойств композиционных материалов по направлениям приложенной нагрузки, необходимы исследования, которые позволят определить место АЭ технологии в практике контроля конструкций из композитов.

Принципиальным ответом на этот вопрос будут результаты исследований, в том числе механи-

ческих испытаний этих материалов, с применением АЭ аппаратуры. В данной работе рассмотрено применение для этих целей аппаратуры на основе последних достижений в области АЭ технологии.

В рамках международного проекта Aero-UA Институтом электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины была проведена серия АЭ испытаний образцов из композитного материала Udo UD CST 150/300 на основе связующего ARALDITE 564 (механические свойства приведены в таблице), изготовленных Национальным аэрокосмическим университетом им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт».

Первоначальная цель исследования заключалась в определении принципиальной тестируемости этого композиционного материала с использованием датчиков, оборудования и АЭ технологий, реализованных с использованием приборов ЕМА-4 [5] (рис. 1). Отметим в качестве дополнительной информации, что положительные результаты при исследовании технических возможностей метода АЭ для контроля углепластиков, используемых в аэрокосмической технике, уже получали другие исследователи, причем достаточно давно [6], и до сегодняшнего дня эти работы продолжаются [7], что говорит об их актуально-

Т а б л и ц а . Механические свойства углепластика Udo UD CST 150/300 на основе связующего ARALDITE 564

Характеристика	Значение	Коэффициент вариации, %
Модуль упругости при растяжении в направлении основы ткани E_{1p} , ГПа	161,48	8,59
Предел прочности при растяжении в направлении основы ткани F_{1p} , МПа	1811,3	7,14
Модуль упругости на сжатие в направлении основы ткани E_{1c} , ГПа	121,84	6,88
Предел прочности при сжатии в направлении основы ткани F_{1c} , МПа	458,3	21,14
Коэффициент Пуассона μ_{12} при растяжении	0,26	13,96
Коэффициент Пуассона μ_{12} при сжатии	0,3	8,22
Модуль упругости в направлении утка ткани E_{2} , ГПа	9,9	9,87
Предел прочности при растяжении в направлении утка ткани F_{2p} , МПа	11,6	28,64
Коэффициент Пуассона μ_{21}	0,064	35,6
Разрушающее напряжение σ_b , для ($\pm 45^\circ$), МПа	162,0	12,93
Модуль сдвига G_{12} , ГПа	4,317	4,93
Напряжение F_{12} , МПа кгс/мм ²	35,5	7,67
Разрушающее напряжение σ_b при сжатии образца ($\pm 45^\circ$), МПа	143,0	8,04
Модуль упругости при сжатии образца ($\pm 45^\circ$), ГПа	17,88	27,62

сти. В данной работе проведена оценка возможности применения приборов ЕМА, разработанных Институтом электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, для обнаружения повреждений и контроля состояния композитных конструкций на основе углепластика.

Предоставленный образец углепластика представлял собой тонкую пластину размером 310×260×2,1 мм.

Исследования на акустическую проводимость материала и точность локации координат источников АЭ сигналов на плоскости проводили с использованием четырех датчиков ДАЭ-01, каждый из которых поочередно использовался в качестве генератора акустических волн. Датчики размещали на небольшом расстоянии от края образца, так что образовали локационную антенну размером 230×200 мм. После проверки акустической проводимости первоначальная пластина была разрезана на полосы 310×30 мм, которые использовали в качестве образцов для испытаний на разрыв. Часть образцов была ослаблена круговыми концентраторами (рис. 2) с целью установления возможности их локации методом АЭ в процессе нагружения.

Первые же опыты показали, что исследуемый материал обладает высокой акустической чувствительностью, сравнимой с таковой у многих металлов. Прохождение АЭ волн через материал

было нормальным. Возможность определения координат сигналов была обеспечена с достаточной точностью. Кроме того, было выполнено ручное простукивание образца тонким металлическим стержнем в разных направлениях, при этом координаты также определялись хорошо.

При определении местоположения источников АЭ с использованием датчиков в качестве генератора волн скорости волн АЭ в материале подбирались таким образом, чтобы расчетные координаты сигналов АЭ, излученных датчиками, а затем принятых АЭ прибором, максимально точно совпали с координатами датчика-излучателя. Здесь сразу сказался эффект анизотропии исследуемого материала.

Если при прозвучивании металлов скорости в продольном и поперечном направлениях обычно практически не отличаются и составляют от 3 до 5 мм/мкс, то для материала Udo UD CST эти скорости отличаются почти в два раза. Добиться картины, приведенной на рис. 3, удалось, задав скорости 8 мм/мкс в направлении X, соответствующем короткой стороне пластины, и 4 мм/мкс в



Рис. 1. Приборы ЕМА-4 (Evaluation of Materials Ability) в 4-х и 16-ти канальном варианте

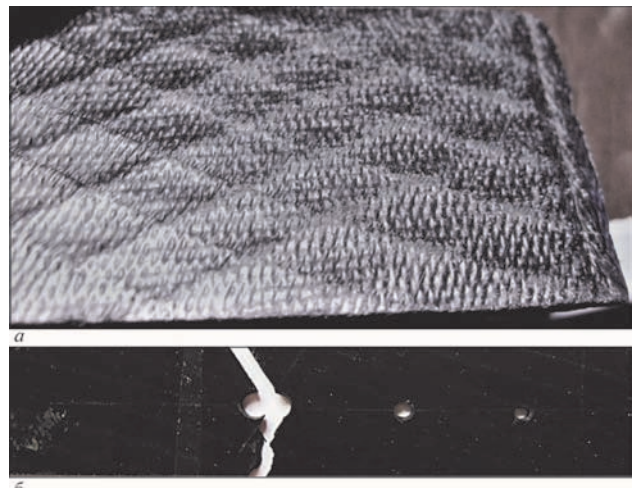


Рис. 2. Образец с хорошо видимой армированной структурой материала (а) и образец с круговыми концентраторами после разрыва (б)

направлении Y , соответствующем длинной стороне. Отметим, что в программе ЕМА-3.9 [8], которая использовалась при испытаниях, центры акустической активности, объединенные в кластеры, показаны флажками, цвет которых отображает амплитуду последнего вошедшего в кластер события АЭ, а число рядом с флажком показывает, сколько событий АЭ попало в кластер.

Результаты определения скоростей волн АЭ подтверждаются и ручным простукиванием пластины в отдельных точках, расположенных по диагонали (рис. 4). Как видим, координаты мест ударов по пластине хорошо ложатся на условную диагональ.

Представленные опыты неоднократно повторяли. Результаты их обработки показали, что, во-первых, данный материал является контролепригодным с точки зрения АЭ и, во-вторых, обеспечивает необходимую точность определения координат источников АЭ.

Определение скоростей волн АЭ в материале является необходимым этапом перед его механическими испытаниями, поскольку при их проведении требуется определять координаты возникших источников АЭ излучения и определять их характер и степень влияния на общее состояние материала.

Дальнейшие испытания материала проводили путем растяжения образцов размером 310×30 мм в разрывной машине с жесткими условиями нагружения. Для исследований применялась аппаратура ЕМА-3. Для локации координат источников АЭ использовали 2 датчика, расстояние между которыми в разных экспериментах варьировали.

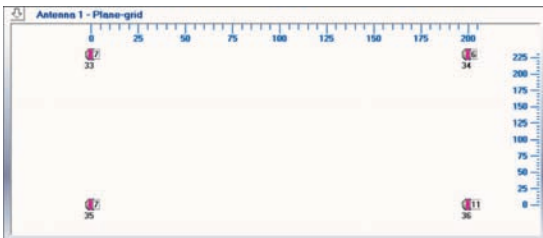


Рис. 3. Результаты прозвучивания пластины встроенным в датчики генератором акустических сигналов. Высокая точность определения координат видна на рисунке (центры акустической активности показаны флажками и совпадают с местами расположения датчиков АЭ)

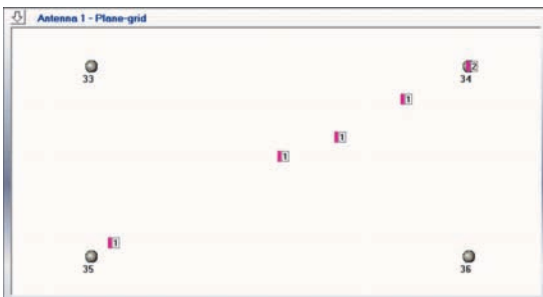


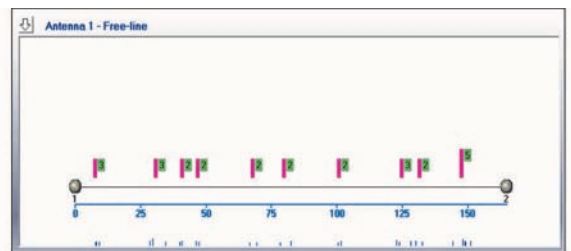
Рис. 4. Результаты прозвучивания пластины путем ручного простукивания металлическим стержнем. Центры акустической активности показаны флажками и совпадают с местами ударов по пластине

Первые испытания проводили на образцах без концентраторов и показали, что в процессе нагружения акустическая эмиссия возникает в различных точках по длине образца и распределена достаточно равномерно (рис. 5, а).

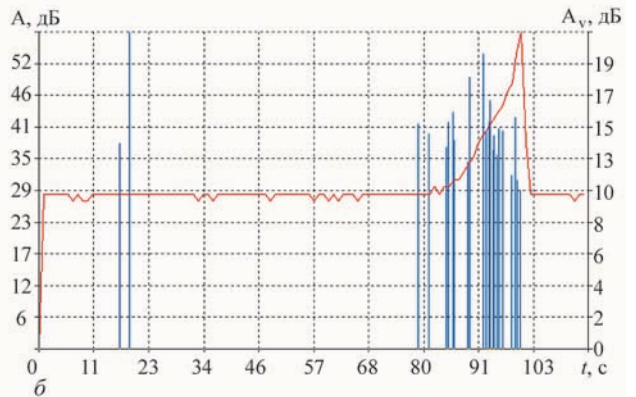
В то же время появление событий АЭ не является равномерным во времени и можно четко выделить две группы таких событий – одну в начале нагружения, вторую непосредственно перед разрушением. Отметим также, что перед разрушением происходит резкий подъем уровня непрерывной АЭ в 2 раза (рис. 5, б).

Испытания образца с концентраторами представляют значительный интерес, поскольку их фиксация методом АЭ на образце может служить основой для определения местоположения концентраторов в реальных конструкциях. Схема образца с круговыми концентраторами диаметром 5, 3 и 2 мм, соответственно, приведена на рис. 6.

В случае нагружения образца с концентратором картина несколько отличается от представленной на рис. 5. События АЭ образуют более крупные кластеры, что говорит о присутствии в материале очагов концентрации, в которых разруше-



а



б

Рис. 5. Результаты испытания образца с концентраторами: а – распределение АЭ по длине образца; б – амплитуда АЭ (А, столбчатый график) и непрерывная АЭ (Av, линейный график) в зависимости от времени

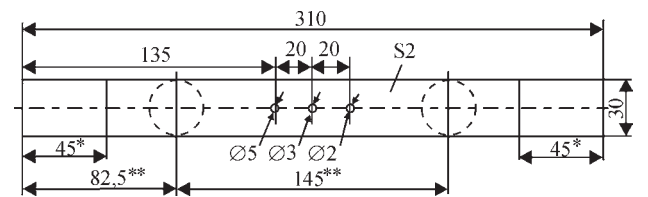


Рис. 6. Схема образца с концентраторами. (* – расстояния до датчиков и между датчиками; ** – расстояния от захватов разрывной машины)

ние развивается наиболее интенсивно. Несмотря на малые отверстия в образце, полученные путем сверления, зона развития разрушения вблизи каждого из них превышает размеры самих отверстий.

Из представленных на рис. 7, а кластеров, образованных путем обработки событий АЭ, три средних соответствуют местам расположения концентраторов с достаточно высокой точностью.

АЭ показывает центр кластера в точке 47 мм, в то время как центр отверстия концентратора отстоит от датчика АЭ на 52,5 мм. Второй кластер имеет центр 78 мм при центре соответствующего отверстия 72,5 мм. Третий – 102 и 92,5 мм, соответственно. Для первых двух кластеров разница в определении координат источника АЭ, т. е. концентратора, составляет 5,5 мм при том, что рекомендуемая погрешность измерений не должна превышать 5 % от расстояния между близлежащими датчиками АЭ, в данном случае это 7,5 мм. Немного большая погрешность для третьего кластера хорошо объяснима тем, что соответствующий ему концентратор напряжений имеет наименьший диаметр, и, соответственно, зона формирования разрушения вблизи этого концентратора имеет меньшие размеры, чем вблизи остальных. Разрушение образца произошло по отверстию концентратора с наибольшим диаметром. Причиной этого, помимо более широкого поля влияния концентратора напряжений вблизи отверстия, также послужило и максимальное исключение материала в процессе сверления, что дало наименьшую площадь сечения образца для восприятия нагрузки.

Из этого можно сделать дополнительный вывод о том, что наиболее важным представляется более

четкое, чем в материале без концентратора, появление плотной группы событий АЭ на начальной стадии нагружения. Это говорит о возможности раннего обнаружения проблем с нарушением прочности и целостности данного материала.

Появление, как и в случае образца без концентратора, двукратного скачка непрерывной АЭ перед разрушением также свидетельствует о применимости метода АЭ для своевременного обнаружения процесса трещинообразования. Полученные результаты говорят о принципиальной возможности создания методики применения метода АЭ на практике при контроле композитных материалов подобного типа. Для этого требуются дальнейшие исследования в этом направлении и получение набора статистических данных, которые позволили бы установить необходимые критерии безопасности эксплуатации конструкций из композиционных материалов при их мониторинге методом АЭ.

Выводы

1. Исследования показали, что композиционный материал Udo UD CST 150/300 на основе связующего ARALDITE 564 является контролепригодным с точки зрения метода АЭ, позволяет определять координаты источников АЭ с достаточно высокой точностью при тестовом прозвучивании и излучает волны АЭ в процессе деформирования и разрушения.

2. АЭ при проведенных испытаниях образцов образует две разделенные во времени группы событий. Первая возникает вскоре после начала нагружения. Вторая регистрируется непосредственно перед разрушением и в процессе его, вплоть до полного разделения образца на части.

3. При наличии концентраторов метод АЭ позволяет с достаточной для практики точностью определить их местоположение в процессе нагружения образца.

4. Важным для регистрации предразрушающего состояния и момента разрушения в проведенных экспериментах представляется резкое двукратное повышение уровня непрерывной АЭ.

5. Создание методики контроля композитов с применением АЭ технологии и построения алгоритма прогнозирования разрушения материала на основе приборов серии ЕМА возможно, но требует дополнительных исследований с целью четкой отработки критериев, характеризующих разрушение.

Список литературы

1. Недосека А. Я. (2008) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций*. Б. Е. Патон (ред.). Киев, Индпром.
2. Патон Б. Е., Лобанов Л. М., Недосека А. Я. и др. (2012) Опыт ИЭС им. Е. О. Патона в области акустико-эмиссионного контроля. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1, 7–22.
3. Патон Б. Е., Лобанов Л. М., Недосека А. Я. и др. (2014) О применении АЭ технологии при непрерывном мони-

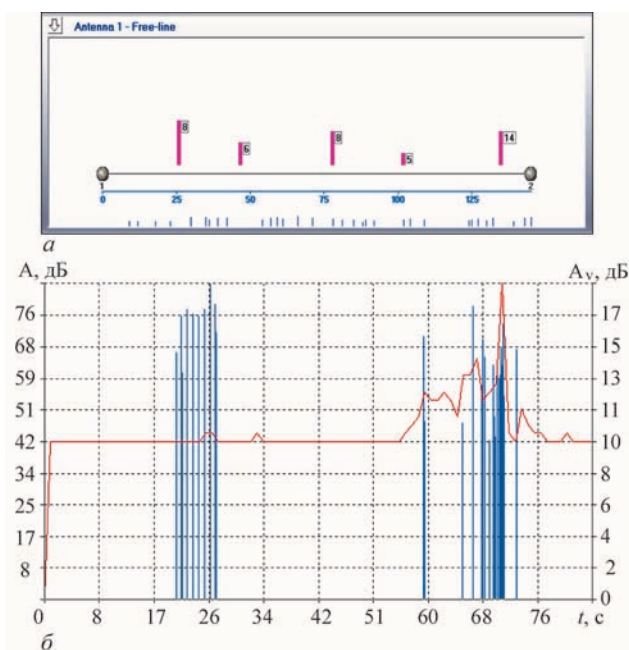


Рис. 7. Результаты испытания образца без концентраторов: а – распределение АЭ по длине образца; б – амплитуда АЭ (А, столбчатый график) и непрерывная АЭ (А_в, линейный график) в зависимости от времени

торинге трубопроводов энергетических комплексов, работающих при высокой температуре. Там же, 3, 7–14.

4. Патон Б. Е., Лобанов Л. М., Недосека А. Я. и др. (2016) Интеллектуальные технологии в оценке состояния конструкций (АЭ технология и контролирующая аппаратура нового поколения на ее основе). Там же, 2, 3–18.
5. Недосека А. Я., Недосека С. А., Грузд А. А. и др. (2010) Приборы для акустико-эмиссионного контроля и диагностирования сварных конструкций. Автоматическая сварка, 8, 58–61.
6. Zimcik D. G., Proulx D., Roy C., Maslouhi A. (1987) Real-Time monitoring of carbon-epoxy composites using acoustic emission NDE. In: Proc. of 19th Int. SAMPE Tech. Conf., Crystal City, VA, Oct. 13–15, 1987, Vol. 19. Covina, Calif., pp. 360–370.
7. Esola, S., Wisner, B. J., Vanniamparambil, P. A. et al. (2018) Qualification Methodology for Composite Aircraft Components Using Acoustic Emission Monitoring. Appl. Sci., 8, 1490. https://doi.org/10.3390/app8091490.
8. Недосека А. Я., Недосека С. А., Яременко М. А. и др. (2013) Программное обеспечение систем АЭ диагностики ЕМА-3.9. Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 3, 16–22.

References

1. Nedoseka, A.Ya. (2008) Fundamentals of calculation and diagnostics of welded structures. Ed. by B.E. Paton. Kiev, Indprom.
2. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya. et al. (2012) Experience of the E.O.Paton Welding Institute of the NAS of Ukraine in the field of acoustic-emission monitoring. Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol, 1, 7-22 [in Russian].
3. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya. et al. (2014) On application of AE technology at continuous monitoring of piping of power units operating at high temperature. Ibid., 3, 7-14 [in Russian].
4. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya. et al. (2016) Smart technologies and new generation control equipment on its basis. Ibid., 2, 3-18 [in Russian].
5. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Gruzd, A.A. et al. (2010) Instruments for acoustic emission control and diagnostics of welded structures. The Paton Welding J., 8, 50-53.
6. Zimcik D. G., Proulx D., Roy C., Maslouhi A. (1987) Real-Time monitoring of carbon-epoxy composites using acoustic emission NDE. In: Proc. of 19th Int. SAMPE Tech. Conf., Crystal City, VA, Oct. 13–15, 1987, Vol. 19. Covina, Calif., pp. 360–370.
7. Esola, S., Wisner, B.J., Vanniamparambil, P.A. et al. (2018) Qualification methodology for composite aircraft components using acoustic emission monitoring. Appl. Sci., 8, 1490. https://doi.org/10.3390/app8091490.
8. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Yaremenko, M.A. et al. (2013) Software of AE diagnostic systems EMA-3.9. Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol, 3, 16-22 [in Russian].

АКУСТИЧНА ЕМІСІЯ ПРИ ВИПРОБУВАННІ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

С. А. НЕДОСІКА¹, А. Я. НЕДОСІКА¹, М. А. ШЕВЦОВА²,
О. М. ГУРЬЯНОВ¹, О. О. ВАМБОЛЬ¹

¹ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». 61070, м. Харків, вул. Чкалова 17. E-mail: khai@khai.edu

Композиційні матеріали, в тому числі і на основі ниток вуглецю, що забезпечують разом з необхідною міцністю чималу економію у вазі створюваної конструкції будь-якої форми і дозволяють реалізувати унікальні характеристики при їх використанні, знаходять все більш широке застосування при створенні конструкцій і вимагають розробки надійного неруйнівного методу оцінки їх стану, в тому числі в процесі експлуатації. У даній роботі виконана оцінка можливості застосування методу АЕ на базі апаратури типу ЕМА для контролю композиційного матеріалу Udo UD

CST 150/300 на основі зв'язуючого ARALDITE 564. Виконано перевірку локації координат джерел АЕ на ненавантаженій пластині і зразках, підданих статичному навантаженню. Перевірена можливість виділення різних стадій навантаження за сигналами АЕ. Показано, що досліджуваний композиційний матеріал є контролепридатним з точки зору методу АЕ, дозволяє визначати координати джерел АЕ з досить високою точністю при тестовому прозвучуванні і випромінює хвилі АЕ в процесі деформування і руйнування. При наявності концентраторів можна з достатньою для практики точністю визначити їх місце розташування в процесі навантаження зразка. При проведених АЕ випробуваннях зразків на розтяг виділено дві розділені у часі групи подій, перша з яких виникає незабаром після початку навантаження, а друга безпосередньо перед руйнуванням і в процесі його. Відзначено різке дворазове підвищення рівня безперервної АЕ при реєстрації передруйнівного стану і моменту руйнування. Відзначено принципову можливість створення методики контролю композитів із застосуванням АЕ технології і прогнозуванням їх стану після додаткових досліджень з метою чіткого відпрацювання критеріїв, що характеризують руйнування. Бібліогр. 8, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: акустична емісія, композитні матеріали, стадія навантаження, деформування, локація координат, передруйнівний стан, контроль

ACOUSTIC EMISSION AT COMPOSITE MATERIAL TESTING S.A. NEDOSEKA¹, A.Ya. NEDOSEKA¹, M.A. SHEVTSOVA², A.N. GURYANOV¹, A.A. VAMBOL¹

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS Ukraine,
11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²N.E.Zhukovski National Aerospace University «Kharkiv
Aviation Institute», Chkalov str., 61070, Kharkiv.

E-mail: khai@khai.edu

Composite materials, including those based on carbon filaments, ensuring a rather great reduction of the weight of the developed structure of any shape, alongside the required strength, and allowing realization of unique characteristics at their application, are becoming ever wider applied at creation of structures and require development of a reliable nondestructive method for evaluation of their state, in particular, in service. Possibility of application of AE method based on EMA type instrumentation to control composite material Udo UD CST 150/300 with ARALDITE binder 564 was assessed in this work. Verification of the location of AE source coordinates was performed on an unloaded plate and on samples under static loading. Possibility of separation of different loading stages by AE signals was checked. It is shown that the studied composite material is testable from the viewpoint of AE method, allows determination of AE source coordinates with sufficiently high accuracy at test sounding and emits AE waves during deformation and fracture. In the presence of concentrators it is possible to determine their location during sample loading, with sufficient degree of accuracy for practical purposes. During the conducted AE testing of samples for tensile testing, two groups of events separated in time were singled out. The first of them appears soon after the start of loading, and the second one – directly before fracture and during it. An abrupt two times increase of the continuous AE level was noted at recording of the pre-fracture state and the moment of fracture. A fundamental possibility of development of the composites control procedure with AE technology application and prediction of their state after additional studies with the purpose of precise determination of the criteria, characterizing fracture, is noted. 8 Ref., 1 Tabl., 7 Fig.

Keywords: acoustic emission, composite materials, loading stage, deformation, coordinate location, prefracture state, control

Поступила в редакцію 27.11.2018