

УДК 620.1

А.И. Шилова, В.Э. Вильдеман, Д.С. Лобанов, Ю.Б. ЛяминПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ
УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
НА ОСНОВЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ
С РЕГИСТРАЦИЕЙ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

Работа посвящена исследованию кинетики разрушения углеродных композиционных материалов на основе параметрического анализа сигналов акустической эмиссии. Проведены механические испытания на растяжение и сжатие образцов, изготовленных из углепластика на различных стадиях технологического передела. В процессе экспериментов производилась непрерывная запись сигналов акустической эмиссии с помощью установки Vallen AMSY-6, а также ее синхронизация с универсальной электромеханической системой Instron 5882 и бесконтактным видеоэкстензометром AVE Instron. Для подавления шумов высокочастотного и низкочастотного происхождения проводилась фильтрация регистрируемых сигналов акустической эмиссии. В качестве основных параметров сигнала акустической эмиссии выбраны амплитуда сигнала и энергетический параметр сигнала. Для анализа кинетики разрушения введён специальный параметр повреждённости, характеризующий степень накопления дефектов в материале. В результате полученных данных построены диаграммы зависимостей основных параметров сигнала от перемещения, кривые накопления повреждений. Выявлена зависимость сигналов от кинетики разрушения композиционного материала. На основе анализа информативных параметров акустической эмиссии выделены основные этапы разрушения углепластика. Зафиксировано различие в регистрируемых сигналах в зависимости от вида испытаний и технологии изготовления материала.

Ключевые слова: экспериментальная механика, испытание на растяжение, испытание на сжатие, углеродные композиционные материалы, акустическая эмиссия, механизмы разрушения.

A.I. Shilova, V.E. Vildeman, D.S. Lobanov, Y.B. Lyamin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**RESEARCHING MECHANISMS OF CARBON COMPOSITES
FRACTURE BASED ON THE MECHANICAL TESTS
MONITORING ACOUSTIC EMISSION**

The article is devoted to the research of carbon composites fracture kinetics based on the acoustic emission characteristics. Tensile and compression tests were conducted on the samples produced from carbon reinforced polymer on different stages of technological conversion. During experi-

ments the monitoring of acoustic emission was carried out in a continuous mode with an acoustic emission measurement system Vallon AMSY- 6 as well as its synchronization with the electromechanical system Instron 5882 and advanced non-contacting video extensometer (AVE) Instron. The filtration of registered acoustic emission signals was carried to high and low-frequency noise reduction. The peak amplitude and the energy parameters are selected as main parameters of the acoustic emission signals. The damage parameter is introduced to analyze fracture kinetics. This parameter characterizes the degree of defect accumulation in the material. As a result, main acoustic emission's parameters versus displacement diagrams and damage accumulation curves are constructed. The correlation signals between fracture kinetics are brought out. The main stages of the carbon reinforced polymer fracture are distinguished based on a parametric acoustic emission analysis. Difference in the recorded signals, depending on the types of test and manufacturing material is observed.

Keywords: experimental mechanics, tensile test, compression test, carbon reinforced polymer, acoustic emission, damage mechanisms.

Введение

Изучение процессов накопления повреждений в процессе деформирования материалов, механизмов их разрушения является важной задачей для прогнозирования прочности и надёжности конструкций из композитов.

В настоящее время перспективным методом исследования формирования несплошностей в материалах в процессе нагружения является метод акустической эмиссии (АЭ). Он основан на регистрации звуковых сигналов, которые излучает материал в результате внутренней динамической локальной перестройки его структуры. К основным преимуществам метода можно отнести его высокую чувствительность к растущим дефектам, меньшее количество ограничений, связанных со свойствами и структурой материалов, возможность контроля в реальном масштабе времени, отсутствие необходимости специальной подготовки поверхности исследуемого материала [1]. Вопросы использования систем регистрации сигналов АЭ применительно к испытаниям композиционных материалов рассмотрены в работах [2–8].

Таким образом, метод АЭ позволяет в реальном масштабе времени собирать информацию о процессах деформации, механизмах разрушения, перестройки структуры, количественно оценить степень накопления повреждений и т.д.

Целью данной работы является исследование особенностей деформирования углеродных композитов на основе параметрического анализа сигналов акустической эмиссии применительно к изучению процессов накопления повреждений углеродных композиционных материалов на полимерной основе.

1. Материалы и методика проведения испытаний

Экспериментальные исследования осуществлялись на базе использования современного оборудования Центра экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механические испытания проводились на универсальной электромеханической системе Instron 5882 с использованием бесконтактного видеоэкстензометра AVE Instron и установки регистрации сигналов АЭ Vallen AMSY-6 (рис. 1).



Рис. 1. Испытательная система Instron 5882 с видеоэкстензометром AVE Instron и установкой регистрации сигнала акустической эмиссии Vallen AMSY-6 в процессе испытания образца на растяжение

Ряд вопросов, связанных с проведением экспериментальных исследований волокнистых композитов, рассмотрены в работах [9–11].

На рис. 2 приведены фотографии образцов на растяжение и сжатие, изготовленные из углепластика на различных стадиях технологического передела (в дальнейшем материалы *A* и *B*).

В качестве основного параметра, характеризующего поврежденность материала, рассматривался энергетический параметр сигнала акустической эмиссии, вычисляемый по формуле

$$E = \int_0^T U(t)^2 dt,$$

где $U(t)$ – электрическое напряжение сигнала на выходе преобразователя акустической эмиссии; T – константа, которая определяется исходя из параметров испытания. В данной работе устанавливалась $T = 6,5$ мс.

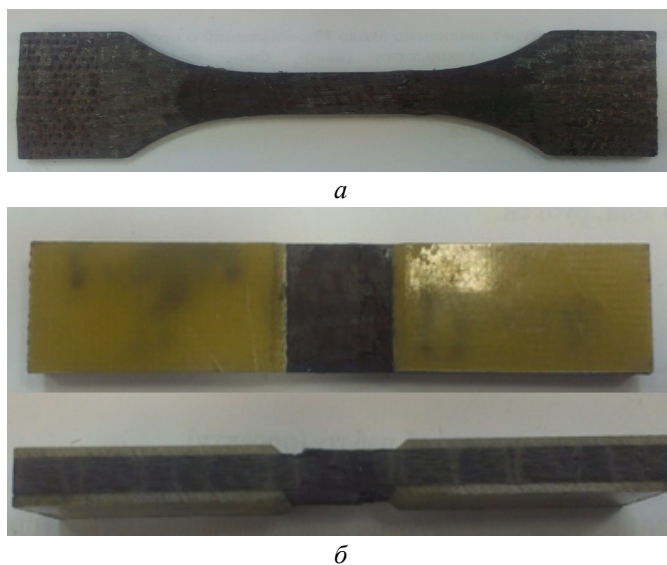


Рис. 2. Образцы для проведения испытаний: *a* – образец для испытаний на растяжение; *б* – образец для испытаний на сжатие

Суммируя значения энергетического параметра за все предыдущие временные интервалы, можно ввести параметр поврежденности, который отражает степень накопления дефектов в материале.

Регистрация параметров акустической эмиссии проводилась в непрерывном режиме. Исследование включало в себя испытания на растяжение 10 образцов (по 5 образцов для каждого типа материала) и испытания на сжатие 10 образцов (по 5 образцов для каждого типа материала) с одновременной регистрацией сигналов акустической эмиссии. Образцы нагружались с постоянной скоростью передвижения траверсы 10 мм/мин при растяжении и 2 мм/мин – при сжатии.

2. Результаты исследования

На рис. 3 приведены диаграммы зависимостей нагрузки и параметров акустической эмиссии от перемещения для образцов на растяжение, выполненных из материалов *A* и *Б*.

Анализируя полученные данные, весь процесс деформирования углеполимера при растяжении можно условно разделить на три этапа.

На первом этапе изменения параметров акустической эмиссии для всех образцов не происходит, что свидетельствует об отсутствии развивающихся дефектов в материале.

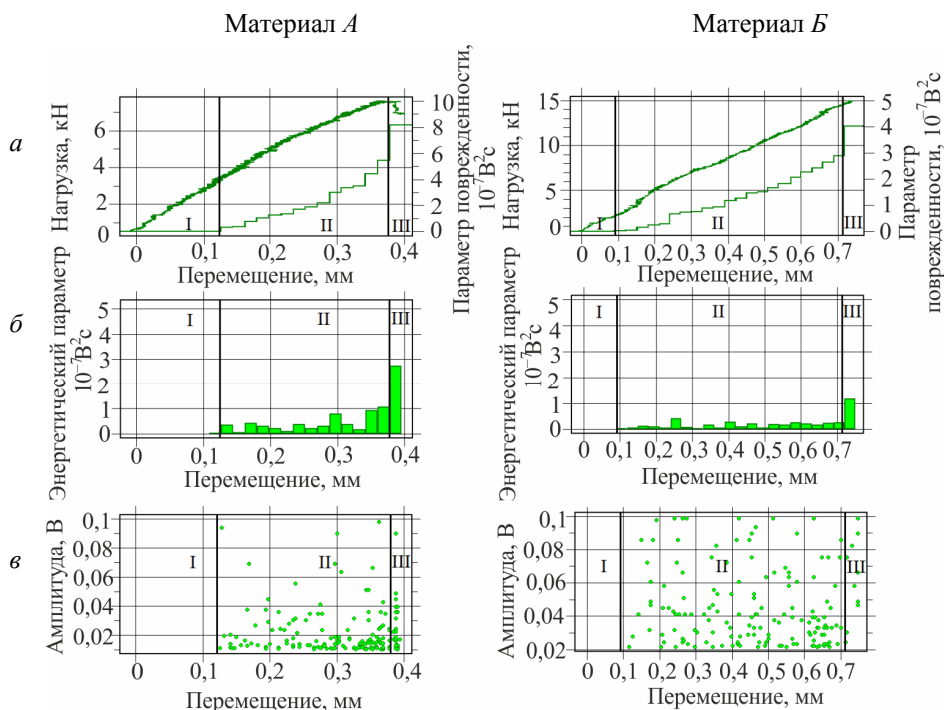


Рис. 3. Результаты испытаний на растяжение образцов материала А и Б: а – диаграмма деформирования, совмещенная с зависимостью параметра поврежденности от перемещения; б – зависимость энергетического параметра сигнала акустической эмиссии от перемещения; в – зависимость амплитуды акустико-эмиссионного сигнала от перемещения

На втором этапе происходит равновесное накопление повреждений в материале. Присутствие сигналов амплитудой 0,055–0,1 В согласно [12] может свидетельствовать о разрыве отдельных волокон или пучков волокон, присутствие сигналов невысокой амплитуды (ниже 0,035 В) – о микрорастрескивании матрицы, наличие сигналов амплитудой 0,035–0,045 В свидетельствует о разрыве адгезионных связей. Также на данном этапе происходит рост параметра поврежденности материала.

Третий этап характеризуется лавинообразным накоплением повреждений и развитием магистральной трещины до критической длины, сопровождающимся резким ростом энергетического параметра акустико-эмиссионного сигнала, что является характерным признаком потери несущей способности образца.

На рис. 4 приведены диаграммы зависимостей нагрузки и параметров акустической эмиссии от перемещения для образцов на сжатие, выполненных из материала *А* и *Б*.

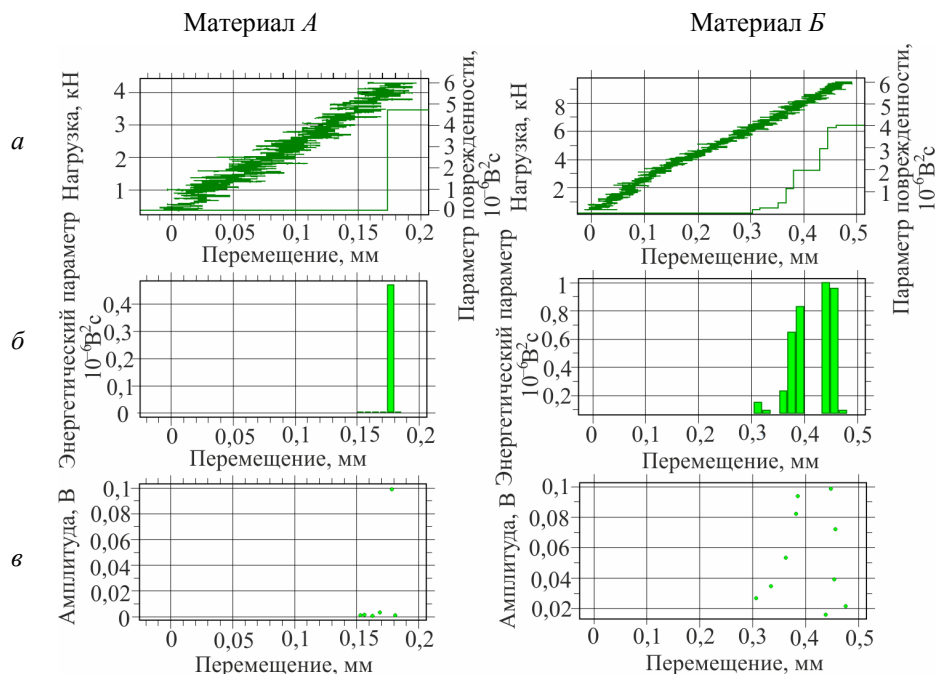


Рис. 4. Результаты испытаний на сжатие образцов материала *А* и *Б*: *а* – диаграмма деформирования, совмещенная с зависимостью параметра поврежденности от перемещения; *б* – зависимость энергетического параметра сигнала акустической эмиссии от перемещения; *в* – зависимость амплитуды акустико-эмиссионного сигнала от перемещения

Разрушение материала *А* при испытаниях на сжатие происходит за счёт растрескивания матрицы и разрыва адгезионных связей, о чем свидетельствует присутствие сигналов небольшой амплитуды. Разрушение материала *Б* происходит за счёт растрескивания матрицы и разрушения волокон при потере устойчивости, что также подтверждается сигналами АЭ.

Заключение

Метод акустической эмиссии позволяет получить дополнительную информацию о кинетике деформационных процессов и смене механизмов разрушения.

В результате проведенного исследования, выявлено, что характер разрушения углепластика зависит от технологии его изготовления. Это подтверждается регистрацией различных сигналов акустической эмиссии. Также зафиксировано различие в регистрируемых сигналах в зависимости от вида испытаний. При испытаниях на растяжение общее количество зарегистрированных импульсов выше, чем при испытаниях на сжатие. Для материалов выделены стадии накопления повреждений с применением параметрического анализа сигналов. Исходя из полученных данных можно предположить, что один из материалов обладает лучшей адгезией между компонентами.

В дальнейшем планируется провести серию испытаний образцов углерод-углеродных композиционных материалов на различных стадиях технологических переделов с применением метода акустической эмиссии для изучения влияния технологических факторов на процессы деформирования материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по грантам 13-08-00304 и 13-08-96016 p_урал_a.

Библиографический список

1. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 7: в 2 кн. Кн. 1. В.И. Иванов, И.Э. Власов. Метод акустической эмиссии. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 340 с.
2. Коллакот Р. Диагностика повреждений. – М.: Мир, 1989. – 512 с.
3. Исследование локализованной деформации при нагружении образцов из углерод-углеродного композиционного материала с различными концентраторами напряжений по данным акустоэмиссии, метода корреляции цифровых изображений и тензометрии / С.В. Панин, М.В. Бурков, А.В. Бяков, П.С. Любутин, С.А. Хижняк // Перспективные материалы. – 2011. – № 13. – С. 129–139.
4. Kim Y.-B., Choi N.-S. Characteristics of thermo-acoustic emission from composite laminates during thermal load cycles // KSME international journal. – 2003. – No. 17. – P. 391–399.
5. Pollock A. Acoustic Emission Inspection // Metals Handbook, Ninth Edition ASM International. – 1989. – No. 17. – P. 278–294.

6. Satalla N., Alber M., Kahraman S. Analyses of acoustic emission response of a fault breccias in uniaxial deformation // *Bulletin of engineering geology and the environment*. – 2010. – No. 69. – P. 455–463.

7. Taghizadeh J., Najafabadi M. A. Classification of Acoustic Emission Signals Collected During Tensile Tests on Unidirectional Ultra High Molecular Weight Polypropylene Fiber Reinforced Epoxy Composites Using Principal Component Analysis // *Russian journal of nondestructive testing*. – 2011. – No. 47. – P. 491–500.

8. Woo S.-C., Kim J.-T., Kim J.-Y., Kim T.-W. Correlation of fracture processes and damage mechanisms of armor structural materials under high strain rates with acoustic emission characteristics // *International journal of impact engineering*. – 2013. – No. 63. – P. 29–42.

9. Экспериментальные исследования свойств материалов при сложных термомеханических воздействиях / В.Э. Вильдеман [и др.] / под ред. В.Э. Вильдемана. – М.: Физматлит, 2012. – 204 с.

10. Research of the effectiveness of mechanical testing methods with analysis of features of destructions and temperature effects / A.V. Babushkin, D.S. Lobanov, A.V. Kozlova, I.D. Morev // *Frattura ed Integrita Strutturale*. – 2013. – Vol. 24. – P. 89–95.

11. Экспериментальные исследования деформационных и прочностных свойств наномодифицированных стеклотекстолитов / В.Э. Вильдеман [и др.] // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2012. – Т. 78, № 7. – С. 57–61.

12. Rizzo P., Lanza di Scalea F. Acoustic emission monitoring of carbon-fiber-reinforced-polymer brinige stay cables in large-scale testing // *Experimental mechanics*. – 2001. – Vol. 43, No. 3. – P. 282–290.

References

1. Nerazrushashchiy kontrol': spravoshchnik [Nondestructive testing: handbook]. Ed. V.V. Klyuev. Vol. 17: Part 1: Ivanov V.I., Vlasov I.E. Metod akusticheskoiy emissii [Acoustic emission method]. Moscow: Mashinostrojeniye, 2006. 340 p.

2. Kollakot R. Diagnostika razrusheniy [Diagnostic of damage]. Moscow: Mir, 1989. 512 p.

3. Panin S.V., Burkov M.V., Byakov A.V., Lyubutin P.S., Khizhnyak S.A. Staging of a localized deformation during tension of specimens of a carbon-carbon composite material with holes of different

diameters according to acoustic-emission, surface-deformation mapping, and strain-gauging data. *Russian journal of nondestructive testing*, 2012, vol. 48, no. 10, pp. 598-608.

4. Kim Y.-B., Choi N.-S. Characteristics of thermo-acoustic emission from composite laminates during thermal load cycles. *KSME international journal*, 2003, no. 17, pp. 391-399.

5. Pollock A. Acoustic Emission Inspection. *Metals Handbook. Ninth Edition ASM International*, 1989, no. 17, pp. 278-294.

6. Satalla N., Alber M., Kahraman S. Analyses of acoustic emission response of a fault breccias in uniaxial deformation. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 2010, no. 69, pp. 455-463.

7. Taghizadeh J., Najafabadi M.A. Classification of Acoustic Emission Signals Collected During Tensile Tests on Unidirectional Ultra High Molecular Weight Polypropylene Fiber Reinforced Epoxy Composites Using Principal Component Analysis. *Russian journal of nondestructive testing*, 2011, no. 47, pp. 491-500.

8. Woo S.-C., Kim J.-T., Kim J.-Y., Kim T.-W. Correlation of fracture processes and damage mechanisms of armor structural materials under high strain rates with acoustic emission characteristics. *International journal of impact engineering*, 2013, no. 63, pp. 29-42.

9. Eksperimentalnyie issledovaniya svoystv materialov pri slozhnykh termomekhanicheskikh vozdeystviyakh [Experimental investigation of the materials properties under complex thermomechanical influences]. Ed. V.E. Vildeman. Moscow: Fizmatlit, 2012. 204 p.

10. Babushkin A.V., Lobanov D.S., Kozlova A.V., Morev I.D. Research of the effectiveness of mechanical testing methods with analysis of features of destructions and temperature effects. *Frattura ed Integrita Strutturale*, 2013, vol. 24, pp. 89-95.

11. Vildeman V.E., Babushkin A.V., Nikulin S.M., Tretyakov M.V., Lobanov D.S., Struk N.V. Eksperimentalnyie issledovaniya deformatsionnyih i prochnostnyih svoystv nanomodifitsirovannyih steklotekstolitov [Experimental investigation of the deformation and strength properties of nano-modified fiberglass]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2012, vol. 78, no. 7, pp. 57-61.

12. Rizzo P., Lanza di Scalea F. Acoustic emission monitoring of carbon-fiber-reinforced-polymer bridge stay cables in large-scale testing. *Experimental mechanics*, 2001, vol. 43, no. 3, pp. 282-290.

Сведение об авторах

Шилова Алиса Игоревна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры механики композиционных материалов и конструкций, инженер Центра экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: cem.shilova@gmail.com).

Вильдеман Валерий Эрвинович (Пермь, Россия) – доктор физико-математических наук, профессор, директор Центра экспериментальной механики, профессор кафедры механики композиционных материалов и конструкций Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: wildemann@pstu.ru).

Лобанов Дмитрий Сергеевич (Пермь, Россия) – аспирант, младший научный сотрудник Центра экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: cem.lobanov@gmail.com).

Лямин Юрий Борисович (Пермь, Россия) – начальник отдела Уральского научно-исследовательского института композиционных материалов (614014, г. Пермь, ул. Новозвягинская, 57, e-mail: uniikm@yandex.ru).

About the authors

Shilova Alisa Igorevna (Perm, Russian Federation) – Undergraduate Student of Department of Mechanics of Composite Materials and Constructions, Engineer of the Center of Experimental Mechanics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, Russian Federation, e-mail: cem.shilova@gmail.com).

Vildeman Valery Ervinovich (Perm, Russian Federation) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Director of the Center of Experimental Mechanics, Professor of Mechanics of Composite Materials and Structures, Professor, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, Russian Federation, e-mail: wildemann@pstu.ru).

Lobanov Dmitry Sergeevich (Perm, Russian Federation) – Doctoral Student, Junior Scientific Associate of the Center of Experimental Mechanics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, Russian Federation, e-mail: cem.lobanov@gmail.com).

Lyamin Yuriy Borisovich (Perm, Russian Federation) – Head of department, Ural Research Institute of Composite Materials (57, Novozvyaginskaya av., 614014, Perm, Russian Federation, e-mail: uniikm@yandex.ru).

Получено 25.11.2013