

DOI: 10.15593/perm.mech/2014.4.09

УДК 620.1

А.И. Шилова¹, Д.С. Лобанов¹, В.Э. Вильдеман¹, Ю.Б. Лямин²¹Пермский национальный исследовательский
политехнический университет,

Центр экспериментальной механики, Пермь, Россия

²ОАО «Уральский научно-исследовательский институт
композиционных материалов», Пермь, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБРАБОТКИ ТКАНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИТОВ

Исследуется поведение углеродного композита (УКМ) в процессе механических испытаний на растяжение и сжатие. Образцы для испытаний изготавливались из углеродных заготовок с разных технологических этапов производства углерод-углеродного композита. В качестве армирующего компонента материала использовались два типа наполнителя, один из которых подвергался дополнительной высокотемпературной обработке. Механические испытания проводились на универсальной электромеханической системе Instron 5882 с использованием бесконтактного видеоэкстензометра AVE Instron для записи продольных деформаций в образце. В процессе испытаний проводилась непрерывная запись сигналов акустической эмиссии (АЭ) системой AMSY-6 с использованием высокочастотных преобразователей с рабочим диапазоном частот 450-1150 кГц. Во избежание записи шумов, возникающих от рабочих частей испытательной машины, проводилась фильтрация сигналов по низкочастотной компоненте. Также проводилась синхронизация системы записи сигналов АЭ с видеоэкстензометром и установкой для механических испытаний. По полученным результатам строились графики зависимостей нагрузки и параметров сигналов АЭ (пиковая амплитуда, энергетический параметр) от перемещений, а также распределения пиковых амплитуд от количества сигналов. На основании значений параметров выделялись основные механизмы разрушения композита. В зависимости от технологического этапа и типа используемого наполнителя у образцов выявлены различия в процессе накопления повреждений. Сделано предположение, что у материала на основе наполнителя, подвергаемого дополнительной высокотемпературной обработке, наблюдается худшая адгезия компонентов, чем у материала без дополнительной обработки наполнителя. Также выявлено, что изучение прочностных свойств и механизмов разрушения заготовок УКМ с начальных этапов изготовления позволяет спрогнозировать поведение готового материала, без прохождения дорогостоящего и длительного процесса производства.

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

A.I. Shilova¹, D.S. Lobanov¹, V.E. Wildemann¹, Y.B. Lyamin²

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²ООО Ural Research Institute of Composite Materials,
Perm, Russian Federation

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF FABRIC HIGH TEMPERATURE TREATMENT ON THE COMPOSITE STRENGTH PROPERTIES

This work presents an experimental study of carbon composite properties and behavior during tensile and compression tests. Samples were produced from carbon preforms of different processing steps of carbon composite manufacturing. Two types of fabric were used to fabricate the composite. One of them was subject to additional high-temperature treatment. Mechanical tests were conducted on electromechanical system Instron 5882 using advanced non-contacting video extensometer (AVE) Instron to record longitudinal strain inside samples. Continuous acoustic emission (AE) signals monitoring was conducted during tests by acoustic measurement system AMSY-6 and high-frequency sensors with operating band from 450 to 1150 KHz. In order to avoid recording the noise from the working parts of testing machine the low-pass filtering of AE signals was carried out. Synchronization between AE measuring system, electromechanical system and video extensometer was conducted. According to obtained results, diagrams of load and parameters of AE signals (peak amplitude and energy parameter) against displacement, and peak amplitude frequency diagrams were constructed. The main damage mechanisms of the composite were determined based on AE parameters. Depending on processing step and type of used fabric the differences in damage cumulative process were identified, which were connected to adhesive behavior of composite components. It was also revealed that the material behavior could be predicted by studying strength properties and damage mechanisms of carbon composite preforms on the initial production steps without carrying out all the expensive and long process of composite manufacturing.

Keywords: experimental mechanics, tensile tests, compression tests, carbon composites, acoustic emission, damage mechanisms.

Введение

Изучение поведения материала в процессе нагружения позволяет выявить последовательность развития основных механизмов разрушения. Такая информация дает возможность сравнивать материалы с различными типами армирующих компонентов и связующих. Благодаря данным, полученным для композита на начальном технологическом этапе, появляется возможность спрогнозировать его поведение на последующих этапах, без прохождения всего длительного и дорогостоящего процесса изготовления. Перспективным в этом плане является метод акустической эмиссии (АЭ), который позволяет в реальном масштабе времени изучать процессы накопления повреждений в материале и соотносить зарегистрированные сигналы с некоторыми типами

дефектов. Применимость метода к изучению механизмов разрушения композитов рассматривается широким кругом исследователей [1–5]. В работах [6–9] метод АЭ применяется для оценки влияния свойств разных наполнителей на поведение композита в целом.

Для сопоставления механизмов разрушения с данными регистрации сигналов АЭ требуется проведение серии экспериментов определенного рода, таких как растяжение одноволоконного композита, вытягивание волокна из матрицы и др. В настоящей работе будут использованы данные для углеродных композитов, полученные в работах [10–13], согласно которым выделяются два основных диапазона значений пиковых амплитуд регистрируемых сигналов от 30 до 60 дБ для растрескивания матрицы и нарушения адгезии между компонентами и от 60 до 100 дБ для вытягивания и разрывов волокон.

Целью работы является изучение влияния обработки тканевого наполнителя на свойства и поведение в процессе разрушения углеродного композиционного материала на разных технологических этапах с применением метода акустической эмиссии.

Для изготовления каркасов композита использовалась углеродная ткань типа УТ900 саржевого переплетения с равным количеством нитей по основе и утку. Из слоев углеродной ткани набирался пакет толщиной 4 мм, который затем прошивался нитью. Далее половина пакета подвергалась дополнительной термообработке при температуре 1800 °С. Температура первичной термообработки пакета составляла 1400 °С. На первом этапе прошитые маты из углеродной ткани пропитывались полимерным связующим, подвергались сушке на воздухе, укладывались на металлическую пластину и фиксировались механическими цулагами. Полученные формы герметизировались при помощи вакуумного мешка, в котором создавалось давление 4 кПа. Далее сборку помещали в автоклав, в котором создавалось давление 608 кПа, и полимеризовали при температуре 130 °С с последующим медленным охлаждением. После этого из части углепластиковых заготовок с высокотемпературной и без высокотемпературной обработки каркаса в направлении основы вырезались плоские образцы для проведения механических испытаний. Пористость материала с высокотемпературной обработкой наполнителя составляла 7,5 %, без высокотемпературной обработки наполнителя – 4 %.

На втором этапе оставшиеся части углепластиковых пластин проходили карбонизацию с целью превращения связующего в углеродную матрицу (кокс) при температуре 850 °С и насыщались пироуглеродом изотермическим методом до плотности 1550 кг/м³. Далее из углеродуглеродных заготовок с высокотемпературной и без высокотемпературной обработки каркаса в направлении основы вырезались плоские образцы для проведения механических испытаний. Пористость материала с высокотемпературной обработкой наполнителя составляла 3,3 %, без высокотемпературной обработки наполнителя – 4,3 %.

1. Экспериментальное исследование

Исследование включало в себя проведение механических испытаний на растяжение и сжатие плоских образцов с непрерывной регистрацией сигналов акустической эмиссии в процессе нагружения. Образцы были изготовлены из углеродного композиционного материала с разных технологических этапов с наполнителем в виде ткани саржевого переплетения. Для обеспечения разрушения образцов для испытаний на сжатие в пределах рабочей части и во избежание их продольного расслоения и потери устойчивости концевые части образцов были усилены стеклопластиковыми накладками [14]. Материал накладок был выбран с учетом рекомендаций отечественного (ГОСТ 25.602) и зарубежного (ASTM D 3039) стандартов. На рис. 1 приведены эскизы образцов для испытаний. Толщина образцов для двух типов испытаний составляла $3,30 \pm 0,05$ мм. Испытания проводились при комнатной температуре.

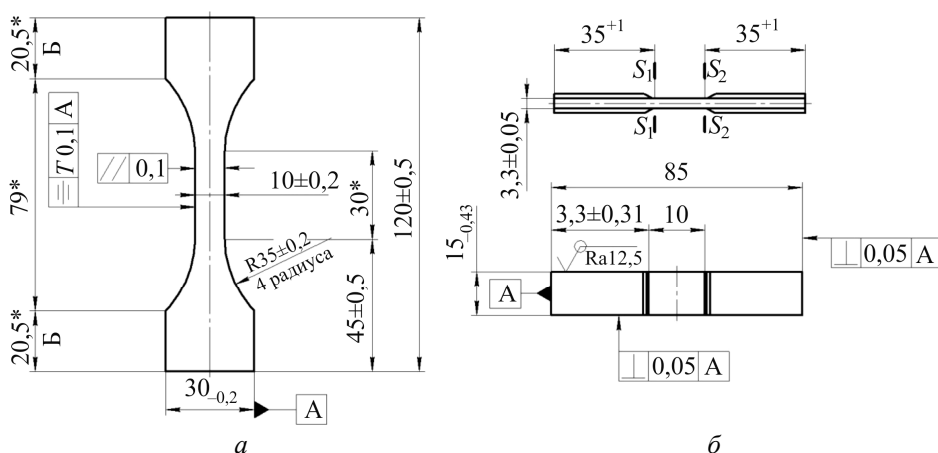


Рис. 1. Эскизы образцов для испытаний на растяжение (а) и сжатие (б)

В качестве нагружающей машины использовалась универсальная электромеханическая система Instron 5882. Для определения продольных деформаций применялся бесконтактный видеоэкстензометр AVE Instron [15–19], измерительная база которого при испытаниях на растяжение составляла 30 мм, при испытаниях на сжатие – 10 мм. Образцы нагружались с постоянной скоростью передвижения траверсы 10 мм/мин при растяжении и 2 мм/мин при сжатии. Непрерывная запись сигналов акустической эмиссии проходила с помощью системы AMSY-6 и высокочастотных преобразователей AE 105A фирмы Vallen. Датчики устанавливались на образец с помощью специальных зажимов через слой контактного геля. Через параметрические каналы проводилась синхронизация системы АЭ с видеоэкстензометром (для записи перемещений) и с системой Instron 5882 (для записи прилагаемой нагрузки). Частота дискретизации данных АЭ составляла 10 МГц. Коэффициент усиления предусилителя составлял 34 дБ. В качестве основных параметров сигналов акустической эмиссии использовались пиковая амплитуда (A) и энергетический параметр (E), который в данной работе рассчитывался по формуле

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

где $U(t)$ – напряжение сигнала на выходе преобразователя акустической эмиссии; $T = 6,5$ мс. Исходя из этого единицами измерения энергетического параметра являются $\text{В}^2\text{с}$. Подробнее формулы расчета энергетического параметра описаны в [20]. Из-за наличия помех от рабочих частей испытательной машины сигналы с пиковыми амплитудами ниже 30 дБ во внимание не принимались.

На основании полученных данных строились графики зависимости нагрузки (N) и параметров АЭ (пиковая амплитуда, энергетический параметр) от перемещений (u). Также строились распределения значений пиковых амплитуд по количеству сигналов, зарегистрированных с такими значениями (M).

2. Результаты испытаний образцов первого технологического этапа

Испытания на растяжение

На рис. 2 приведены типовые диаграммы, построенные по результатам испытаний на растяжение образцов углеродных композиционных материалов с высокотемпературной обработкой наполнителя (УКМ-1) и без нее (УКМ-2), изготовленных из углепластиковых заготовок. Как видно из графиков, величина разрушающей нагрузки для УКМ-1 почти в два раза меньше, чем для УКМ-2, то же отмечается для перемещений. Характер распределения энергетического параметра для обоих материалов схож: постепенное увеличение значений и резкий всплеск в момент разрушения (рис. 2, б, д). При этом величина параметра для УКМ-1 во много раз меньше, чем для УКМ-2. Также и в том, и в другом случае происходит постепенное увеличение значений пиковых амплитуд (рис. 2, в, е). Таким образом, согласно распределению материал в процессе испытания постепенно накапливает повреждения, при достижении максимальной нагрузки происходит их лавинообразный рост, приводящий к разрушению материала.

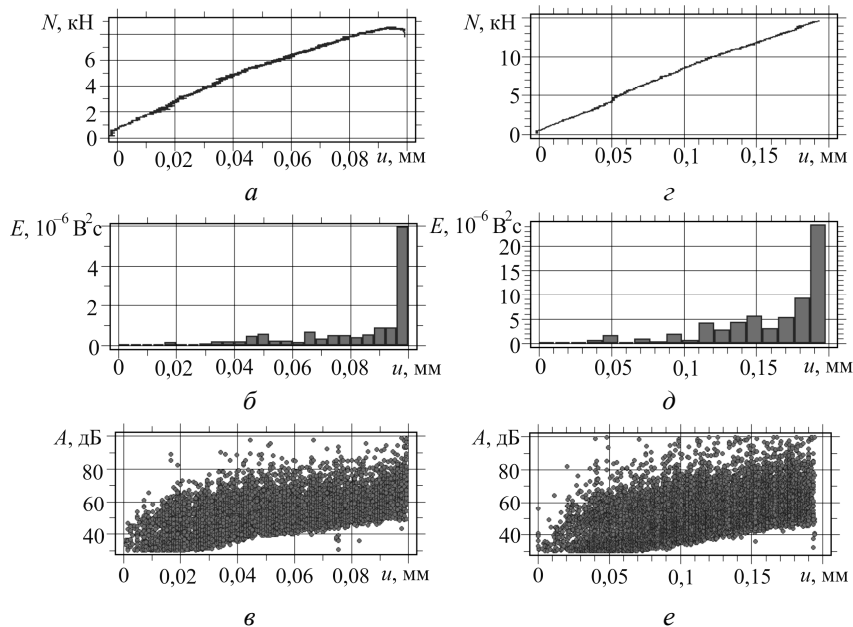


Рис. 2. Результаты испытаний на растяжение УКМ-1 (а–в) и УКМ-2 (г–е): а, г – диаграмма зависимости нагрузки от перемещений; б, д – распределение энергетического параметра; в, е – диаграмма зависимости пиковой амплитуды сигналов от перемещений

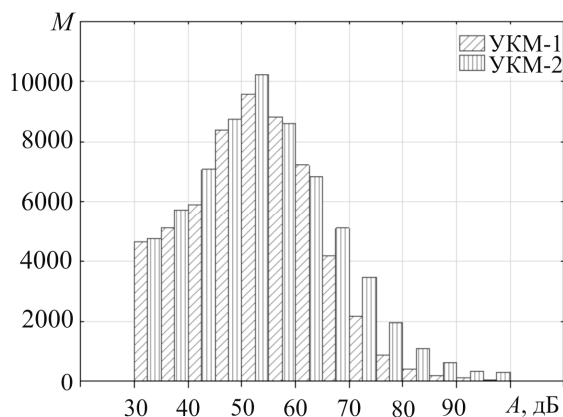


Рис. 3. Распределение сигналов по значениям пиковой амплитуды для УКМ-1 и УКМ-2 при испытаниях на растяжение

На рис. 3 изображено распределение сигналов АЭ по значениям пиковых амплитуд для УКМ-1 и УКМ-2. Согласно данному графику максимальное количество сигналов для обоих материалов приходится на диапазон амплитуд от 50 до 55 дБ. Для УКМ-2 зарегистрировано большее количество сигналов, особенно заметно это на диапазоне амплитуд выше 60 дБ. Для УКМ-1 на этом диапазоне отмечается более резкий спад распределения. Исходя из вышесказанного может быть сделано предположение о том, что для обоих материалов преобладающим механизмом разрушения является растрескивание матрицы. Для УКМ-2 в отличие от УКМ-1 наблюдается большее количество сигналов, которые свидетельствуют о вытягивании и разрывах волокон.

Испытания на сжатие

На рис. 4 приведены типовые диаграммы, построенные по результатам испытаний на сжатие УКМ-1 и УКМ-2. Как видно из диаграмм деформирования, для испытания на сжатие отмечается та же закономерность, что и для испытаний на растяжение: разрушающая нагрузка для УКМ-1 в два раза меньше, чем для УКМ-2. Согласно диаграммам распределения энергетического параметра (рис. 4, б, д), для УКМ-2 в процессе испытаний регистрировались АЭ события с более высокой энергией (на порядок выше), чем для УКМ-1. На начальных этапах нагружения для УКМ-2 регистрировались АЭ события с низкими значениями энергетического параметра. При достижении

определенного значения нагрузки энергетический параметр регистрируемых событий возрастет и достигает максимума в момент разрушения. Согласно рис. 4, *в*, *е* для УКМ-2 амплитуда регистрируемых сигналов постепенно увеличивается в течение всего процесса нагружения, для УКМ-1 увеличение амплитуд выражено не так явно. Таким образом, момент разрушения для УКМ-1 наступает наиболее непредсказуемо.

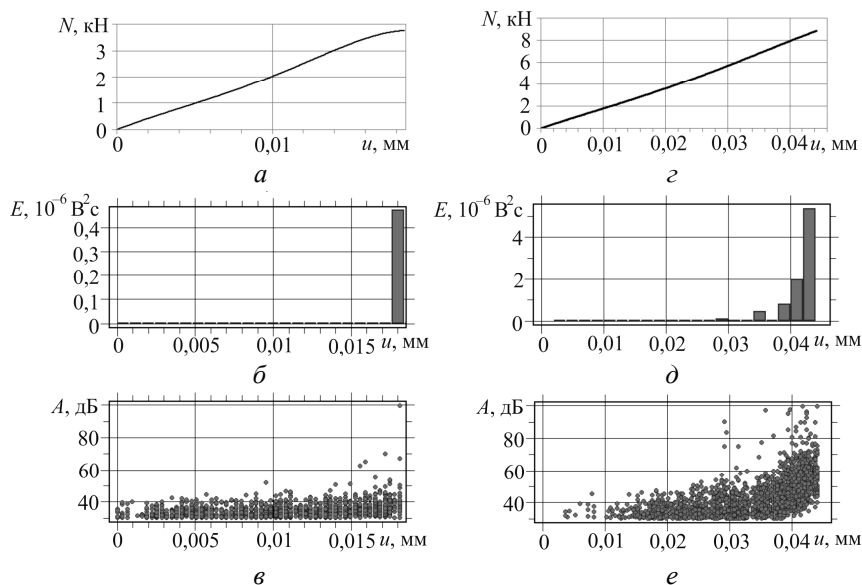


Рис. 4. Результаты испытаний на сжатие УКМ-1 (*а-в*) и УКМ-2 (*з-е*): *а, з* – диаграмма зависимости нагрузки от перемещений; *б, д* – распределение энергетического параметра; *в, е* – диаграмма зависимости пиковой амплитуды сигналов от перемещений

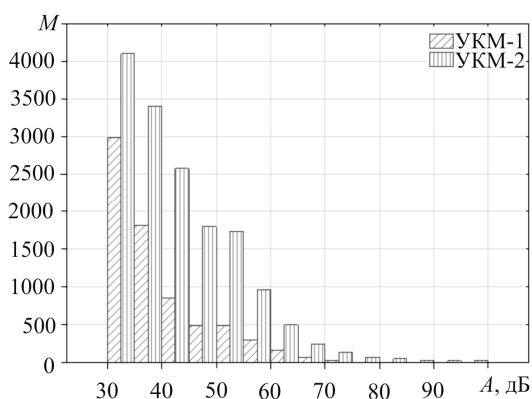


Рис. 5. Распределение сигналов по значениям пиковой амплитуды для УКМ-1 и УКМ-2 при испытаниях на сжатие

На рис. 5 изображено распределение сигналов по значениям пиковых амплитуд для УКМ-1 и УКМ-2 при испытаниях на сжатие. Для обоих материалов зарегистрировано большое количество сигналов с пиковыми амплитудами ниже 40 дБ, при этом для УКМ-2 общее количество сигналов больше, чем для УКМ-1. Помимо сигналов низких амплитуд также зарегистрированы сигналы амплитудами выше 50 дБ. Количество таких сигналов для УКМ-1 меньше, чем для УКМ-2. Согласно рис. 4, в сигналы с высокими амплитудами регистрируются вблизи момента разрушения. Такие сигналы можно связать с вовлечением волокон в процесс разрушения, их вытягиванием и разрывами. Таким образом, при разрушении УКМ-1 преобладают микрорасслоения и растрескивания матрицы, на характер поведения УКМ-2 оказывают большое влияние вытягивание и разрывы волокон.

3. Результаты испытаний образцов второго технологического этапа

Испытания на растяжение

На рис. 6 приведены типовые диаграммы, построенные по результатам испытаний на растяжение образцов углерод-углеродных композиционных материалов с высокотемпературной обработкой наполнителя (УУКМ-1) и без нее (УУКМ-2), изготовленных из углерод-углеродных заготовок. Согласно диаграммам деформирования значение предельной нагрузки для УУКМ-2 ниже, чем для УУКМ-1. Если сравнивать эти значения с величинами, полученными для материалов с предыдущего технологического этапа, то для УУКМ-2 предельная нагрузка снизилась почти в два раза, а для УУКМ-1 она увеличилась. Отличие наблюдается также в форме распределения энергетического параметра: АЭ сигналы с высокими значениями регистрируются уже на начальной стадии нагружения. Причем для УУКМ-1 его значения намного выше, чем для УУКМ-2 (рис. 6, б, д). Для обоих материалов отмечается резкий всплеск энергетического параметра на начальном этапе нагружения, затем происходят спад и стабилизация его значений. При достижении определенного уровня нагрузки, близкого к предельному, параметр начинает увеличиваться и достигает своего максимального значения при разрушении образца. Такое поведение энергетического параметра можно связать с тем, что на начальном этапе нагружения происходит процесс интенсивного образования и роста

микрповреждений, который в дальнейшем стабилизируется. Непосредственно вблизи критического значения нагрузки происходит лавинообразное развитие дефектов, которое приводит к разрушению образца. Согласно рис. 6, в, е пиковые амплитуды регистрируемых сигналов увеличиваются на начальном этапе нагружения и держатся в диапазоне от 55 до 100 дБ для УУКМ-1 и от 60 до 100 дБ – для УУКМ-2.

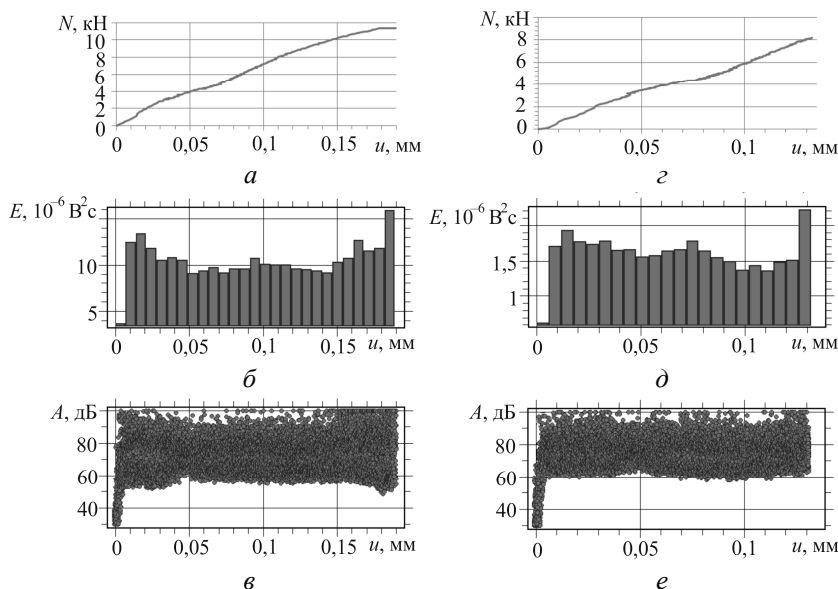


Рис. 6. Результаты испытаний на растяжение УУКМ-1 (а–в) и УУКМ-2 (з–е): а, з – диаграмма зависимости нагрузки от перемещений; б, д – распределение энергетического параметра; в, е – диаграмма зависимости пиковой амплитуды сигналов от перемещений

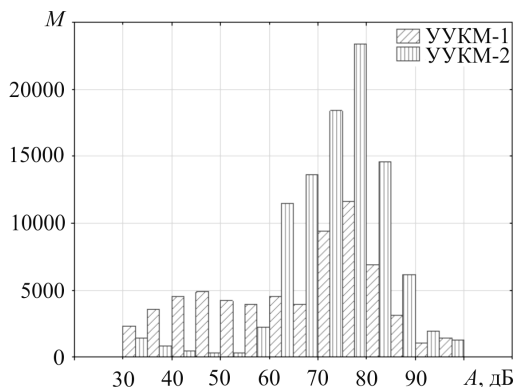


Рис. 7. Распределение сигналов по значениям пиковой амплитуды для УУКМ-1 и УУКМ-2 при испытаниях на растяжение

На рис. 7 приведено распределение амплитуд АЭ сигналов для УУКМ-1 и УУКМ-2 при испытаниях на растяжение. Как видно из диаграмм, отмечается наличие двух пиков на распределениях. Для УУКМ-2 – в диапазонах амплитуд от 75 до 80 дБ и от 30 до 35. Для УУКМ-1 – в диапазонах амплитуд от 75 до 80 дБ и от 45 до 50 дБ. Два пика могут свидетельствовать о преобладании двух механизмов разрушения в материале. Сигналы с высокими значениями амплитуд могут говорить о разрыве волокон в материале, с низкими – о разрушении по межфазовой границе. Для УУКМ-2 зарегистрировано больше событий с высокими амплитудами, которые можно соотнести с разрывами волокон, чем для УУКМ-1, и при этом меньше событий с низкими амплитудами, которые могут свидетельствовать о межфазных расслоениях. Также для УУКМ-1 пик, приходящийся на диапазон низких амплитуд, выражен значительно ярче. Таким образом, для УУКМ-2 преобладающим механизмом разрушения являются разрывы волокон, а для УУКМ-1 помимо разрушения наполнителя происходит растрескивание матрицы.

Испытания на сжатие

На рис. 8 приведены типовые диаграммы, построенные по результатам испытаний на сжатие УУКМ-1 и УУКМ-2. Согласно диаграммам деформирования, предельная нагрузка для УУКМ-1 немного выше, чем для УУКМ-2. Так же как и для испытаний на растяжение, при сравнении с данными, полученными для образцов, изготовленных из углепластиковых заготовок, для УУКМ-1 предельная нагрузка возросла в два раза, а для УУКМ-2 она заметно снизилась. Формы распределения энергетического параметра для обоих материалов имеют схожий характер (рис. 8, б, д). На начальном этапе нагружения регистрируются события с низкими значениями энергетического параметра, затем его величина увеличивается и достигает своего максимума в момент разрушения образца. Согласно рис. 8, в, е на начальном этапе нагружения регистрируется небольшое число сигналов невысокой амплитуды, по мере нагружения образца количество и значения амплитуд сигналов увеличиваются. Такое поведение материала можно связать с постепенным накоплением повреждений в материале, зарождением и ростом микрорасслоений и микротрещин, которые в итоге приводят к разрывам волокон и разрушению всего образца.

На рис. 9 приведено распределение амплитуд АЭ сигналов для УУКМ-1 и УУКМ-2 при испытаниях на сжатие. Как видно из диаграмм, для обоих материалов формы распределения подобны. Основное отличие заключается в наличии ярко выраженного пика в диапазоне от 40 до 55 дБ для УУКМ-2, что может свидетельствовать о больших микрорастрескиваниях и микрорасслоениях.

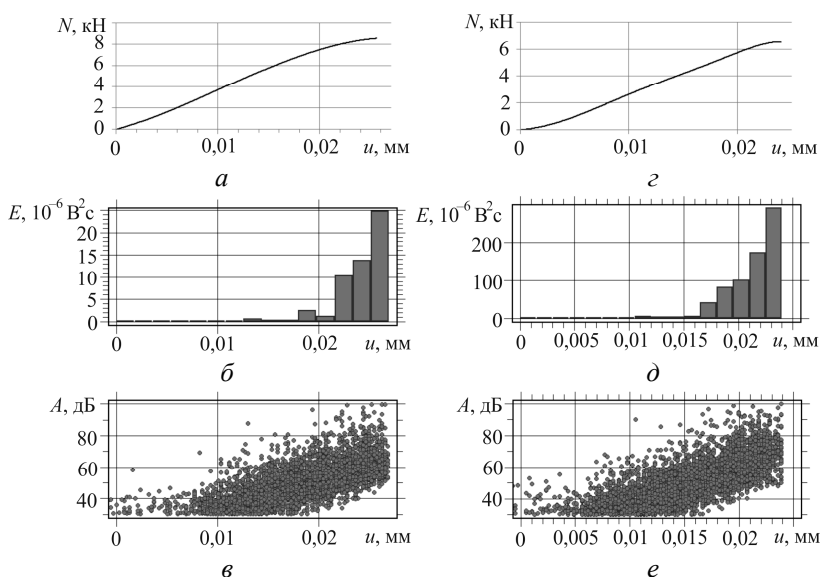


Рис. 8. Результаты испытаний на сжатие УУКМ-1 (а-е) и УУКМ-2 (z-e): а, б – диаграмма зависимости нагрузки от перемещений; б, д – распределение энергетического параметра; в, е – диаграмма зависимости пиковой амплитуды сигналов от перемещений

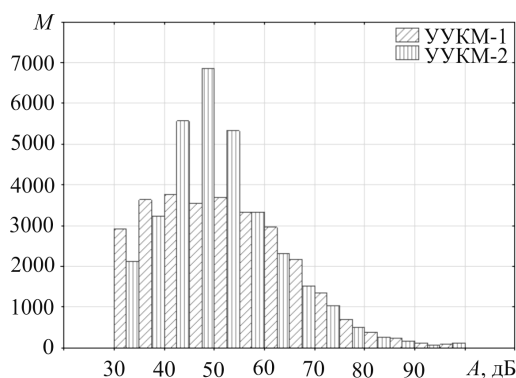


Рис. 9. Распределение сигналов по значениям пиковой амплитуды для УУКМ-1 и УУКМ-2 при испытаниях на сжатие

Заключение

Таким образом, для образцов углеродного композита с высокотемпературной обработкой наполнителя, как при испытании на растяжение, так и при испытании на сжатие, отмечено увеличение значений предельной нагрузки на втором технологическом этапе. При этом на первом этапе значения предельной нагрузки для данного материала почти в два раза меньше, чем для образцов углеродного композита без высокотемпературной обработки наполнителя. Такое отличие может быть связано с разными механизмами разрушения исследуемых материалов. Для испытаний на растяжение образцов первого технологического этапа для обоих материалов преобладающим механизмом разрушения является растрескивание матрицы, при этом у материала без высокотемпературной обработки наполнителя происходит более интенсивное вытягивание и разрывы волокон, чем у материала с высокотемпературной обработкой наполнителя. Для испытаний на сжатие отмечается аналогичная закономерность. На втором технологическом этапе для испытаний на растяжение углерод-углеродного композита с высокотемпературной обработкой наполнителя характерно преобладание двух механизмов разрушения – растрескивание матрицы и разрыв волокон в отличие от материала без высокотемпературной обработки наполнителя, для которого преобладают только вытягивание и разрыв волокон. В итоге можно сделать предположение, что материал без высокотемпературной обработки наполнителя обладает лучшей адгезией компонентов. Таким образом, с помощью изучения прочностных свойств и механизмов разрушения УКМ на начальных этапах изготовления существует возможность спрогнозировать поведение готового материала без прохождения полного процесса его производства.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 13-08-96016 р_урал_а, № 13-08-00304-а).

Список литературы

1. Tamas P., Czigany T. Investigation of mechanical properties and crack propagation behaviour of hybrid composites with epoxy resin matrix // Materials science forum. – 2013. – Vol. 729. – P. 284–289.

2. Kumosa M. Acoustic emission monitoring of stress corrosion cracks in aligned GRP // *Journal of physics D: Applied physics*. – 1987. – Vol. 20. – P. 69–74.

3. Han W.Q., Zhou J.Y. Acoustic emission characterization methods of damage modes identification on carbon fiber twill weave laminate // *Science China: Technological sciences*. – 2013. – Vol. 56. – No. 9. – P. 2228–2237.

4. Influence of water ageing on mechanical properties and damage events of two reinforced composite materials: Flax-fibres and glass-fibres / M. Assarar, D. Scida, A. El Mahi, C. Poilane, R. Ayad // *Materials and design*. – 2011. – Vol. 32. – No. 2. – P. 788–795.

5. Quantification of failure mechanisms in model loading of fiber reinforced plastics utilizing acoustic emission analysis / M.G.R. Sause, T. Muller, A. Horoschenkoff, S. Horn // *Composites science and technology*. – 2012. – Vol. 72. – No. 2. – P. 167–174.

6. Wang Y., Zhang L., Cheng L. Effect of yarn sizes on the tensile damage evolution of a C/SiC composite fabricated by chemical vapor infiltration // *Applied composite materials*. – 2011. – Vol. 18. – P. 165–174.

7. Czigany T., Deak T., Tamas P. Discontinuous basalt and glass fiber reinforced PP composites from textile prefabricates: Effects of interfacial modification on the mechanical performance // *Composite Interfaces*. – 2008. – Vol. 15. – No. 7–9. – P. 697–707.

8. Tamas P., Czigany T. Investigation of mechanical properties and crack propagation behavior of hybrid composites with epoxy resin matrix // *Materials science forum*. – 2013. – Vol. 729. – P. 284–289.

9. Исследование механизмов разрушения углеродных композиционных материалов на основе механических испытаний с регистрацией сигналов акустической эмиссии / А.И. Шилова, В.Э. Вильдеман, Д.С. Лобанов, Ю.Б. Лямин // *Вестник ПНИПУ. Механика*. – 2013. – № 4. – С. 169–177.

10. A study on the failure mechanisms of carbon fiber/epoxy composite laminates using acoustic emission / P.F. Liu, J.K. Chu, Y.L. Liu, J.Y. Zheng // *Materials and design*. – 2012. – Vol. 37. – P. 228–235.

11. Park J.M., Kim J.W., Yoon D.J. Interfacial evaluation and micro-failure mechanisms of single carbon fiber/bismaleimide (BMI) composites by tensile and compressive fragmentation tests and acoustic emission // *Composites science and technology*. – 2002. – Vol. 62. – P. 743–756.

12. Fracture mechanisms in unnotched and notched SiC/SiC composites studied by acoustic emission analysis / M. Shiwa, O.Y. Chen, T. Kishi, S. Carpenter, S. Mitsuno, H. Ichikawa, Y.T. Lee, S.T. Kim, T.S. Lee // *Materials transactions*. – 1995. – Vol. 36. – No. 4. – P. 511–517.

13. Zhuang X., Yan X. Investigation of damage mechanisms in self-reinforced polyethylene composites by acoustic emission // *Composite science and technology*. – 2006. – Vol. 66. – P. 444–449.

14. Гарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. – М.: Химия, 1981. – 272 с.

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

16. Оценка эффективности ремонта в конструкциях из полимерных волокнистых композиционных материалов / А.Н. Аношкин, В.Э. Вильдеман, Д.С. Лобанов, А.И. Чихачев // *Механика композитных материалов*. – 2014. – № 3. – С. 441–450.

17. Лобанов Д.С., Бабушкин А.В. Методика испытаний на одноосное растяжение однонаправленных композиционных материалов при пониженных температурах // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2012. – № 4. – С. 33–41.

18. 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.

19. Механика материалов. Методы и средства экспериментальных исследований: учебное пособие / под ред. В.Э. Вильдемана. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 165 с.

20. Иванов В.И., Власов И.Э. Метод акустической эмиссии // *Не разрушающий контроль: справочник: в 8 т. / под общ. ред. В.В. Клюева*. – М.: Машиностроение, 2006. – Т. 7, кн. 1. – 829 с.

References

1. Tamas P., Czigany T. Investigation of mechanical properties and crack propagation behaviour of hybrid composites with epoxy resin matrix. *Materials science forum*, 2013, vol. 729, pp. 284-289.

2. Kumosa M. Acoustic emission monitoring of stress corrosion cracks in aligned GRP. *Journal of physics D: Applied physics*, 1987, vol. 20, pp. 69-74.

3. Han W.Q., Zhou J.Y. Acoustic emission characterization methods of damage modes identification on carbon fiber twill weave laminate. *Science China: Technological sciences*, 2013, vol. 56, no. 9, pp. 2228-2237.

4. Assarar M., Scida D., El Mahi A., Poilane C., Ayad R. Influence of water ageing on mechanical properties and damage events of two reinforced composite materials: Flax-fibres and glass-fibres. *Materials and design*, 2011, vol. 32, no. 2, pp. 788-795.

5. Sause M.G.R., Muller T., Horoschenkoff A., Horn S. Quantification of failure mechanisms in model loading of fiber reinforced plastics utilizing acoustic emission analysis. *Composites science and technology*, 2012, vol. 72, no. 2, pp. 167-174.

6. Wang Y., Zhang L., Cheng L. Effect of yarn sizes on the tensile damage evolution of a C/SiC composite fabricated by chemical vapor infiltration. *Applied composite materials*, 2011, vol. 18, pp. 165-174.

7. Czigany T., Deak T., Tamas P. Discontinuous basalt and glass fiber reinforced PP composites from textile prefabricates: Effects of interfacial modification on the mechanical performance. *Composite Interfaces*, 2008, vol. 15, no. 7-9, pp. 697-707.

8. Tamas P., Czigany T. Investigation of mechanical properties and crack propagation behavior of hybrid composites with epoxy resin matrix. *Materials science forum*, 2013, vol. 729, pp. 284-289.

9. Shilova A.I., Wildemann V.E., Lobanov D.S., Lyamin Y.B. Issledovaniie mekhanizmov razrusheniia uglerodnykh kompozitsionnykh materialov na osnove mekhanicheskikh ispytaniy s registratsiei signalov akusticheskoi emissii [Researching mechanisms of carbon composites fracture based on the mechanical tests monitoring acoustic emission]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2013, no. 4, pp. 169-177.

10. Liu P.F., Chu J.K., Liu Y.L., Zheng J.Y. A study on the failure mechanisms of carbon fiber/epoxy composite laminates using acoustic emission. *Materials and design*, 2012, vol. 37, pp. 228-235.

11. Park J.M., Kim J.W., Yoon D.J. Interfacial evaluation and micro-failure mechanisms of single carbon fiber/bismaleimide (BMI) composites by tensile and compressive fragmentation tests and acoustic emission. *Composites science and technology*, 2002, vol. 62, pp. 743-756.

12. Shiwa M., Chen O.Y., Kishi T., Carpenter S., Mitsuno S., Ichikawa H., Lee Y.T., Kim S.T., Lee T.S. Fracture mechanisms in unnotched and notched SiC/SiC composites studied by acoustic emission analysis. *Materials transactions*, 1995, vol. 36, no. 4, pp. 511-517.

13. Zhuang X., Yan X. Investigation of damage mechanisms in self-reinforced polyethylene composites by acoustic emission. *Composite science and technology*, 2006, vol. 66, pp. 444-449.

14. Tarnopolskii Ju.M., Kincis T.Ja. Metody staticheskikh ispytaniy armirovannykh plastikov [Static test methods of reinforced plastics]. Moscow: Khimiya, 1981. 272 p.

15. Eksperimentalnye issledovaniia svoistv materialov pri slozhnykh termomekhanicheskikh vozdeistviakh [Experimental investigation of the materials properties under complex thermomechanical influences]. Ed. V.E. Wildemann. Moscow: Fizmatlit, 2012. 204 p.

16. Anoshkin A.N., Wildemann V.E., Lobanov D.S. Otsenka effektivnosti remonta v konstruktsiiakh iz polimernykh voloknistykh kompozitsionnykh materialov [Evaluating the effectiveness of repair in the construction of fiber reinforced polymers]. *Mechanics of Composite Materials*, 2014, no. 3, pp. 441-450.

17. Lobanov D.S., Babushkin A.V. Metodika ispytaniy na odnoosnoe rastyazhenie odnonapravlennykh kompozitsionnykh materialov pri ponizhennykh temperaturakh [Technique of unidirectional composite materials at low temperatures tensile tests]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2012, no. 4, pp. 33-41

18. 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.

19. Wildemann V.E., Babushkin A.V., Tretyakov M.P. [et al.] Mekhanika materialov. Metody i sredstva eksperimentalnykh issledovaniy: uchebnoe posobie [Mechanics of materials. Methods and tools for experimental studies: textbook]. Ed. V.E. Wildemann. Permskii natsionalnyi issledovatel'skii universitet, 2011. 165 p.

20. Ivanov V.I., Vlasov I.Je. Metod akusticheskoi emissii [Acoustic emission method]. Nerazrushajushhii kontrol: spravochnik. Ed. V.V. Kljuev, vol. 7, iss. 1. Moscow: Mashinostroenie, 2006. 829 p.

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 ОАО «Уральский научно-исследовательский институт композиционных материалов» (614014, г. Пермь, ул. Новозвягинская, 57, e-mail: uniikm@yandex.ru).

About the authors

Alisa I. Shilova (Perm, Russian Federation) – Master 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).

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

Dmitry S. Lobanov (Perm, Russian Federation) – Postgraduate 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).

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

Получено 30.10.2014

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Шилова А.И., Лобанов Д.С., Вильдеман В.Э., Лямин Ю.Б. Экспериментальное исследование влияния высокотемпературной обработки тканого наполнителя на прочностные свойства углеродных композитов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2014. – № 4. – С. 221–239. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.4.09

Please cite this article in English as:

Shilova A.I., Lobanov D.S., Wildemann V.E., Lyamin Y.B. Experimental study of the effect of fabric high temperature treatment on the composite strength properties. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2014. No. 4. Pp. 221-239. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.4.09