

05

Коллективные эффекты в системе дефектов масштаба структурного элемента при деформировании гетерогенного материала регулярного строения

© А.М. Лексовский,¹ Г.Н. Губанова,² В.Е. Юдин,² Б.Л. Баскин¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Институт высокомолекулярных соединений РАН,
199004 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: albert.leksowski@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 9 января 2013 г.)

Изучался процесс накопления трещин (разрывов волокон) при деформировании растяжением в традиционном модельном композитном материале с „мелкомасштабным“ структурным элементом ($\sim 10 \mu\text{m}$) посредством регистрации сигналов акустической эмиссии (АЭ) в варианте линейной локации. Статистический анализ потока АЭ-сигналов показал, что увеличение степени коррелированности разрыва волокон в одной области не является фатальным, процесс внезапно „срывается“ и одновременно провоцируется в сопряженной. Этот процесс контролируется исключительно релаксационным механизмом перераспределения локальных напряжений. Формирование ансамбля дефектов в одной области образует в теле гетерогенность нового масштаба и вследствие совместности деформирования это качественно изменяет структуру объекта на более высоком масштабном уровне. В случае множественного образования микро/мезотрещин зарождение магистральной трещины (макроразрушение) определяется возможностью перераспределения поля напряжений между областями более высокого уровня по сравнению с характерным структурным элементом.

Введение

Большое число традиционных конструкционных материалов — полимеров, металлов, композитов и таких грубогетерогенных материалов, как горные породы, бетон и др., реагирует на деформирование посредством образования трещин микро/мезо масштаба. Ансамбли таких трещин, например, в статическом режиме формируются достаточно быстро, а затем их развитие по данным интегральных методов практически заканчивается [1,2]. В настоящее время остается все еще нерешенным вопрос, в какой мере и при каких условиях ансамбли этих многочисленных, условно „стабильных“ трещин определяют работоспособность материала и критическое состояние нагруженного тела в целом. Представляется, что для формулирования физической модели разрушения тела с трещинами, модели „длительной прочности“ экспериментальных данных о развитии ансамбля таких трещин явно недостаточно. Что происходит в ансамбле таких дефектов? Как они развиваются, как взаимодействуют, как объединяются (сливаются)? Известна гипотеза о возможности линейного (упругого) взаимодействия (при определенной концентрации), объединения этих трещинок и формировании таким образом магистральной, разрушающей трещины [3–6]. Однако насколько можно судить по литературе, это наипростейшее предположение до сих пор не нашло своего прямого экспериментального подтверждения. Более того, выявленные в прямом эксперименте свойства индивидуальных, изолированных микротрещин [7–9] дают основание усомниться в физической адекватности такой гипотезы при построении модели разрушения.

Настоящая работа направлена на выяснение реальных свойств ансамбля трещин масштаба структурного элемента.

Для традиционного конструкционного материала в общем случае практически нет инструментальной возможности проследить в реальном масштабе времени не только за взаимодействием индивидуальных микро- и мезотрещин, но и за развитием ансамбля таких трещин. При этом в различных областях материаловедения (см., например, [10,11]) широко распространено использование композитных материалов как удобных и эффективных моделей для физического и компьютерного моделирования.

Представляется, что использование амплитудно-временного в варианте линейной локации и статистического анализа потока сигналов акустической эмиссии (АЭ) в случае деформирования модельных гетерогенных материалов с регулярной структурой, например, армированных высокомолекулярными волокнами, может существенно расширить наши представления об особенностях множественного образования и трансформации микротрещин (микроразрушений). Большое различие в физико-механических свойствах матричного материала и армирующих волокон гарантирует в условиях совместного деформирования первоочередной разрыв высокомолекулярных элементов и практически однозначную идентификацию источников сигналов АЭ в простейшем случае по амплитуде сигналов АЭ. В случае таких модельных композитов можно задать структуру, свойства элементов, управлять образованием множества трещин известного масштаба. Можно исследовать некоторые статистические аспекты поведения ансамбля таких тре-

щин, в случае линейной локации можно даже проследить за рождением и развитием конкретной ограниченной группы трещин во времени и в конкретном сечении образца, а также рассмотреть с одними и теми же элементами структуры поведение не только модельного образца, но и реального конструкционного материала.

Материалы и методика эксперимента

Исследование проводилось на образцах модельных композиций на основе полимерной матрицы, одноосно армированных углеродными волокнами. Углеродное волокно: прочность $\sigma = 2.5$ GPa, модуль Юнга $E = 225$ GPa, разрывная деформация $\varepsilon = 1.1-1.2\%$, матрица на основе эпоксидной смолы ЭДГ-10: прочность $\sigma = 70-90$ МПа, модуль сдвига $E_{\text{shear}} = 0.95-1.1$ GPa, разрывная деформация $\varepsilon = 6-8\%$, углепластик (CFRP): прочность $\sigma = 1890$ МПа, разрывная деформация $\varepsilon = 1.31\%$, модуль Юнга $E = 144$ GPa. В случае углепластика с однонаправленным расположением волокон на основе эпоксидных связующих и углеродной ленты ЭЛУР-П 0.1 образцы имели вид пластин с размерами $160 \times (7-10) \times (0.3-1)$ mm. Объемное содержание углеродных волокон диаметром $\sim 10 \mu\text{m}$ составляло $\sim 60\%$.

Основной комплекс аппаратуры для изучения АЭ на базе микроЭВМ „Электроника-60“ и РС-НР-9835А был разработан и ИАЭ им. Курчатова [12]. Аналоговая часть аппаратуры обеспечивает быстрдействие не хуже 10^3 pulse/s, т.е. интервал τ между разрешаемыми импульсами в потоке может быть не менее 1 ms. Динамический амплитудный диапазон не хуже 60 db, полоса рабочих частот 0.1–1.1 MHz при неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ± 3 db, уровень шумов, приведенный ко входу предусилителя, не более $3 \mu\text{V}$. В блоке цифровых данных вычисляются: амплитуда сигналов A (μV), число осцилляций (превышений сигналом порога дискриминации), длительность импульса θ (ms), интенсивность \dot{N} (количество сигналов АЭ в единицу времени, N/t), энергия сигнала ($W = A^2 \cdot \theta$), мощность сигнала $\dot{W} (A^2 \cdot \theta/t)$, энергия на импульс (W/pulse), разность времен прихода сигналов к датчикам антенны для определения координаты источника сигнала, что при 3D представлении экспериментальных данных увеличивает информативность и существенно сокращает область гипотетических построений. Деформирование производилось со скоростью 0.22 mm/min при 20°C. Два пьезокерамических преобразователя с резонансной частотой ~ 400 kHz крепились на рабочей части на расстоянии 80–100 mm друг от друга.

Результаты экспериментов и их обсуждение

В процессе деформирования растяжением специального модельного образца на основе эпоксидной смолы

ЭД-20 с одним углеродным волокном при достижении разрывной деформации волокна $\sim 1.1\%$ начинается его дробление на фрагменты. На рис. 1 при съемке в поляризованном свете показан пример дробления единичного волокна. Число зарегистрированных импульсов АЭ в этих опытах и координаты разрывов, вычисленных по данным локации, достаточно хорошо совпали с числом разрывов и координатами, непосредственно измеренными с помощью микроскопии. Результаты статистической обработки длин раздробленных волокон на серии образцов дают оценку среднего значения $\sim 280 \mu\text{m}$.

На рис. 2 показано изменение амплитуды сигналов АЭ при множественной фрагментации волокна при растяжении модельного образца. Некоторое возрастание амплитуды сигнала, вероятнее всего, связано с определенной реализацией масштабного эффекта прочности армирующего волокна по мере уменьшения длины разрываемых участков. Величина амплитуды сигнала АЭ, приведенная к входу предварительного усилителя, от одиночного разрыва составила 60–100 μV (рис. 3). Необходимо

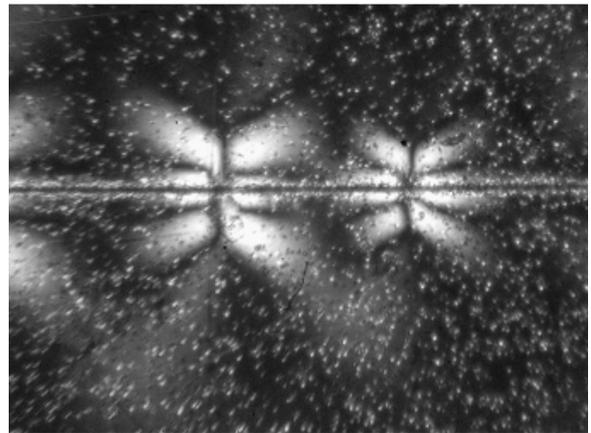


Рис. 1. Пример дробления единичного углеродного волокна диаметром $10 \mu\text{m}$ в модельном образце.

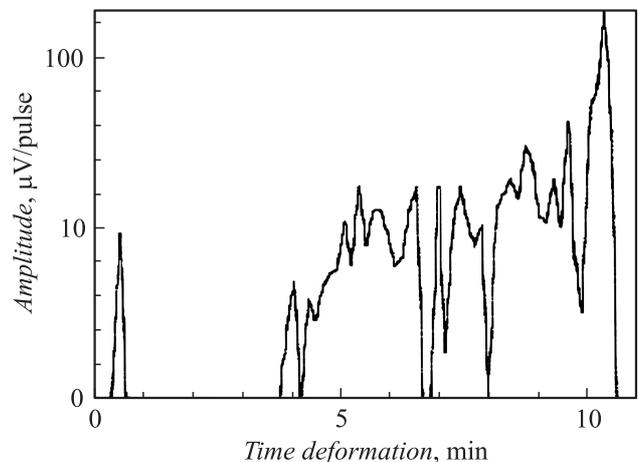


Рис. 2. Изменение амплитуды сигнала АЭ при дроблении моноволокна в модельном образце от времени деформирования со скоростью 0.22 mm/min.

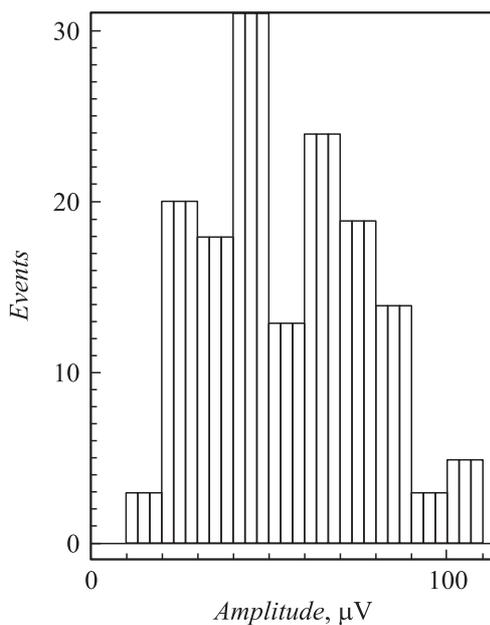


Рис. 3. Итоговое амплитудное распределение сигналов АЭ при множественном дроблении/фрагментации модельного композитного образца с одиночным волокном.

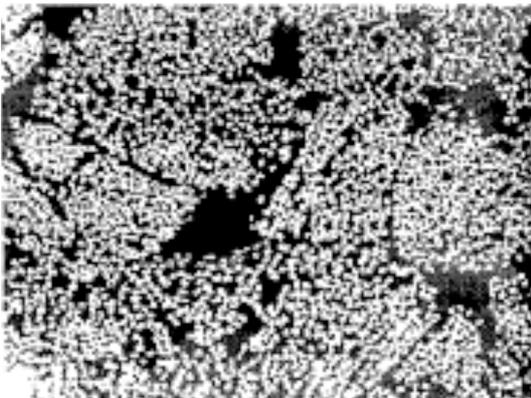


Рис. 4. Фрагмент структуры поперечного сечения образца углепластика, диаметр моноволокна $10\ \mu\text{m}$.

отметить, что наблюдаемый в опытах разброс амплитуд сигналов АЭ может быть связан с разной прочностью волокна по длине, погрешностью расположения волокна в образце относительно оси растяжения, что приводит к появлению сдвиговой компоненты и др.

Перейдем от модельного образца с одним волокном к образцу, который также представляет собой одноосно армированный композит, но содержит уже $\approx 10^5$ углеродных волокон, объемное содержание которых $V_f \approx 60\%$. Пример фрагмента микроструктуры сечения образца углепластика приведен на рис. 4.

Рассмотрим, как происходит накопление разрывов волокон, т. е. образование дефектов типа трещин при растяжении образцов вдоль направления армирующих волокон и что происходит в гетерогенной системе, если в ней

зарождается не одиночная трещинка масштаба структурного элемента, а некое множество. Для этого воспользуемся методом локации сигналов АЭ, достаточно эффективным для таких целей (см., например, [13,14]). На базе рабочей длины $100\ \text{mm}$ при величине сигнала $\sim 100\ \mu\text{V}$ точность определения координаты источника сигнала АЭ по длине образца не хуже $2\ \text{mm}$.

На рис. 5 показано, как по мере растяжения с постоянной скоростью в реальном композитном образце происходит накопление разрывов волокон (образование трещин). Как видно, по данным локации сигналов АЭ процесс разрыва волокон по мере деформирования с постоянной скоростью растяжения развивается не монотонно и не лавиннообразно, а содержит этапы и ускорения, и замедления. Разделение образца на две части в данном случае произошло на $666\ \text{s}$ деформирования в области с координатами $5\text{--}13\ \text{mm}$. Можно видеть, что эта область на всем протяжении деформирования не отличается преимущественным, множественным разрывом волокон, т. е. не наблюдается „предварительная“ подготовка места разрыва. В то же время в соседних областях процесс более интенсивного разрыва волокон в определенные моменты деформирования проявляется достаточно явственно. В области с координатами $21\text{--}13\ \text{mm}$ на протяжении первых $5\ \text{min}$ деформирования процесс разрыва волокон идет значительно активнее. Тем не менее итоговая локализация этого процесса, макроразрыв именно в данном локальном объеме не происходит. Это связано с тем, что появление значительной группы трещин вследствие разрывов волокон обуславливает уменьшение эффективного модуля упругости этой части образца и тем самым в условиях совместного деформирования приводит к перераспределению нагрузки на сопряженные, менее „поврежденные“ области [13,14].

Рассмотрим более детально развитие этого процесса массового зарождения микроразрушений с помощью статистического анализа потока сигналов АЭ в

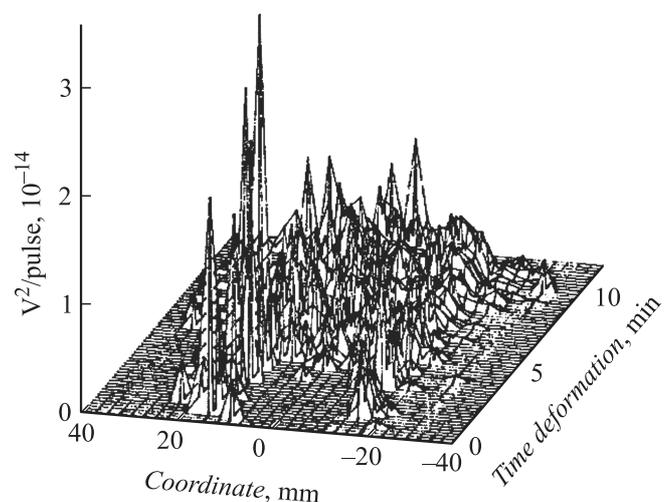


Рис. 5. Изменение энергии сигнала АЭ (V^2/pulse) в разных сечениях композитного образца при деформировании растяжением со скоростью $0.22\ \text{mm}/\text{min}$.

нескольких локальных объемах. Ожидать взаимосвязь между АЭ-событиями следует на том основании, что исследуемая АЭ обусловлена, главным образом, трещинообразованием. Ранее было показано, что микротрещины зарождаются взрывообразно [7,9] с неизменным быстрым спадом первоначальной скорости на несколько порядков. То есть взрывообразное рождение как микро-, так и мезотрещины есть акт дискретного изменения локально запасенной энергии упругой деформации с неотвратимым последующим переходным, релаксационным процессом. Конечный размер микро/мезо трещины зависит от величины локально накопленной энергии и от диссипативных свойств материала [9], которые влияют также и на скорость перераспределения локальных напряжений [15].

Использование аппаратуры с точной фиксацией времени прихода импульса позволяет построить распределение интервалов между импульсами. Для корректного статистического анализа соответствующие выборки должны быть достаточно представительными (70–100 сигналов), а сам процесс практически стационарным, например, изменение интенсивности потока сигналов АЭ, как правило, не должно превышать 20%. В случае полной независимости в появлении сигналов АЭ процесс считается пуассоновским и описывается как $\rho(\Delta\tau) = m \exp(-m\Delta\tau)$, где частота следования событий $m = \dot{N}$ (интенсивность АЭ), $\Delta\tau$ — интервал времени между событиями, $\rho(\Delta\tau)$ — плотность вероятности. Рассмотрим распределение интервалов времени между импульсами АЭ в некоторых сечениях образца в разные моменты деформирования с целью выявления особенностей, например, свидетельствующих о коррелированности, взаимосвязанности разрывов армирующих волокон (микроразрушений).

Несмотря на то что в наших экспериментах с линейной локацией точность определения координат источника АЭ составляет ~ 2 мм для набора достаточной статистики сигналов, для большей надежности (определенности) будем рассматривать события в зонах несколько больших размеров ≈ 9 мм по длине образца.

На рис. 6,а показан пример пуассоновского распределения интервалов времен между импульсами АЭ в образцах углепластика на участке деформирования 480–510 с в зоне 5–13 мм, т.е. в зоне итогового разделения образца на две части. Как можно видеть, распределение интервалов времен следования в этом случае практически не отличается от теоретической „пуассоновской“ экспоненты. Это означает, что в данной области образца на этом этапе деформирования (за 150 с до макроразрыва, который произошел на 666 с) процесс разрыва волокон является независимым, пуассоновским. Но, как и можно было ожидать, такая ситуация может быть не всегда и не в любом месте. На рис. 6,б приведено распределение интервалов времен следования в той же зоне 5–13 мм общей диаграммы, но на более позднем участке деформирования — 590–616 с. Это распределение уже отличается от „теоретического“ пуассоновского. Основное отличие от экспоненты наблюдается

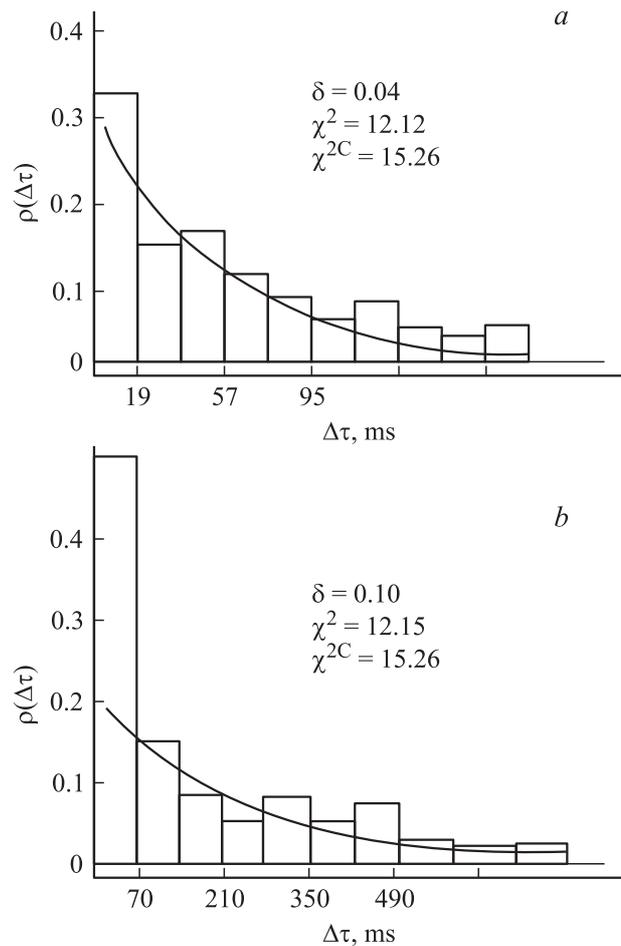


Рис. 6. Распределение интервалов времен следования сигналов АЭ в зоне будущего макроразрыва на разных стадиях деформирования.

в области времен ~ 70 ms. В этом случае [16] можно говорить о пуассоновском процессе скопления, в пределах которых имеется некоторая упорядоченность, хотя в целом события в анализируемом потоке событий являются независимыми. Количественной мерой отклонения от „пуассоновости“, т.е. мерой „упорядоченности“, может служить [17] параметр $\delta = |1 - \Delta\tau/\sigma_\tau|$. Здесь $\Delta\tau$ — средний интервал времени между импульсами в данной выборке событий, σ_τ — среднеквадратичное отклонение. Оказалось, что такой анализ позволяет получить более детальную информацию о развитии процесса разрушения.

На рис. 7 показано изменение этого параметра „упорядоченности“, коррелированности АЭ-событий δ по ходу деформирования образца углепластика (АЭ-диаграмма которого представлена на рис. 5) в зоне будущего разрыва и в 2 соседних областях. Из данных рис. 7 можно видеть, что в последние $\sim 30\%$ общего времени деформирования образца углепластика процесс разрыва волокон, процесс трещинообразования начинают переходить со стадии независимых, несвязанных событий к этапу коррелированного взаимодействия. При этом

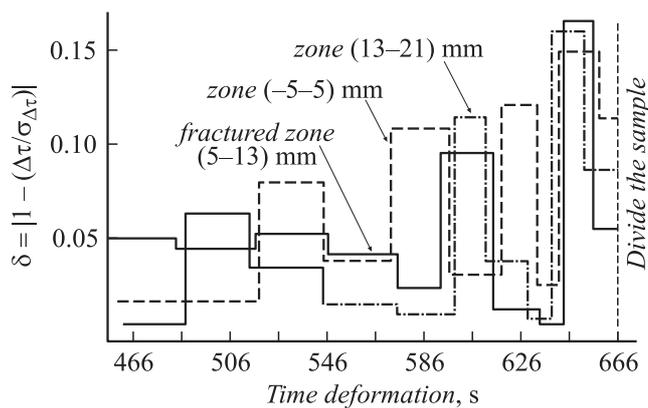


Рис. 7. Изменение параметра „упорядоченности“ (δ) потока АЭ-событий δ в трех соседних зонах однонаправленного углепластика при деформировании со скоростью 0.22 mm/min.

в локальных областях, соседних с местом будущего макроразрыва, этот процесс развивается интенсивнее. Тем не менее в будущей зоне разрыва 5–13 mm параметр δ имеет устойчиво значимую величину и при этом наблюдается явная тенденция его кратного увеличения. То есть имеет место рост степени упорядоченности, коррелированности в потоке АЭ-событий — влияния одного события на последующее. Эта тенденция не монотонна, имеет пульсирующий характер с периодом спада и подъема при данной скорости деформирования в несколько десятков секунд. Наблюдается противофазность в изменении степени упорядоченности потока АЭ-событий в локальных областях, соседних с местом макроразрыва. Увеличение степени коррелированности АЭ-событий — разрыва волокон (трещинообразования) в одной области образца внезапно прерывается, но одновременно такой же процесс провоцируется в соседней области. При этом необходимо отметить, что даже простое сохранение некоторого уровня коррелированности в потоке сигналов АЭ в течение десятков секунд в условиях нарастания внешней нагрузки свидетельствует о протекании в локальном объеме эффективной разрядки концентрации энергии упругой деформации. Именно снижение уровня локальных напряжений в результате бурного процесса микроструктурных перестроений ликвидирует на определенное время движущую силу этого процесса в данной области, провоцируя его развитие в соседних областях. Каждое увеличение δ — это увеличение общей „длины“ или числа цепочек коррелированных разрывов волокон. Это уже как бы старт того лавинообразного процесса, который при нарастающей внешней нагрузке обязан привести к макроразрыву, как можно было бы ожидать, если бы была справедлива гипотеза концентрационного критерия разрушения [5]. Но оказывается, что каждый раз это всего лишь фальстарт. В эксперименте с композицией D16T-B(2.5%), в которой при деформировании вследствие фрагментации борных волокон диаметром 100 μm в объеме $(2.1 \times 4.3 \times \sim 3)$ mm рабочей части образца образуются всего ~ 30 трещин, подобная перегрупп-

пировка при варьировании температуры и скорости деформирования проявляется предельно явно [14,18]. Следует обратить внимание на некоторые тонкие детали формирования „критического“ состояния деформируемого образца. В интервале 630–645 s деформирования можно увидеть дополнительное снижение параметра δ в зоне будущего разрыва, в то время как в соседних зонах резко увеличивается степень коррелированности. И еще дополнительный нюанс — в течение последних 10 s деформирования непосредственно перед макроразрывом во всех трех рассматриваемых областях наблюдается резкое снижение степени коррелированности. Это означает, что в данный отрезок времени происходит перераспределение напряжений на другие участки образца. Но отследить эту фактически „последнюю“ перегруппировку в данном случае корректно не удается из-за недостаточного количества АЭ-событий ($\ll 50$).

График пульсации параметра коррелированности на рис. 7 свидетельствует о постепенном исчерпании емкости не только отдельных областей, но и системы как целого. При этом видно, что в этом процессе, контролируемом релаксационным механизмом перераспределения напряжений, нет точки „невозврата“; изменением текущего напряженно-деформированного состояния (температура, скорость деформирования) его можно замедлить или даже приостановить.

Что можно сказать о масштабе генерируемых трещин в этом образце при растяжении со скоростью 0.22 mm/min в последние 150 s? В пределах физического объема зоны разрыва размером $\sim (9 \times 10 \times 0.3)$ mm находится $\sim 10^5$ волокон, т.е. $16.1 \cdot 10^5$ структурных элементов длиной $2l_{\text{ineff}} = 560 \mu\text{m}$, которые в традиционной композитной системе с однонаправленным расположением волокон гипотетически могли бы быть разорваны независимо. Всего для образца в целом было зарегистрировано $\approx 1.2 \cdot 10^4$ сигналов АЭ с амплитудой $\sim 60\text{--}100 \mu\text{V}$. На зону разрыва приходится $\sim 10^3$, т.е. итоговая поврежденность в этой зоне составляет

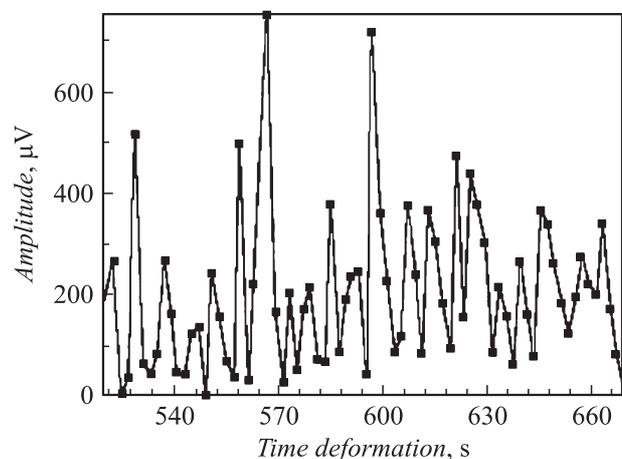


Рис. 8. Изменение амплитуды АЭ-сигналов в зоне будущего макроразрыва однонаправленного углепластика в течение последних 150 s деформирования.

всего 0.08% от максимально возможной. Из данных на рис. 8 можно видеть, что в зоне разрыва 5–13 mm на последнем этапе деформирования 510–660 s „длина цепочек“ коррелированного (при релаксационном перераспределении напряжений) трещинообразования (разрыв волокон) в среднем составляла всего 3–4 структурного элемента. При этом разрывы могут быть как изолированными геометрически несопряженными, так и составить „эффективную“ единую трещину. Ни в зоне разрыва, ни в соседних с ней областях, нигде в течение последней 1 ms (!) в эксперименте не было зарегистрировано сигнала большей величины, в то время как АЭ-система способна фиксировать амплитуды, на два порядка превышающие максимальные сигналы 3D АЭ-картины на рис. 5. Это означает, что релаксационный механизм перераспределения локальных напряжений, несмотря на постоянно растущую нагрузку, не позволяет в пределах 1 ms последовательно генерировать большего размера „цепочек“ связанных событий.

Заключение

Как можно было видеть выше, результаты исследования процесса накопления трещин мезомасштаба (разрывов волокон) в традиционном модельном композитном материале с „мелкомасштабным“ структурным элементом ($\sim 10 \mu\text{m}$) посредством регистрации сигналов АЭ в варианте линейной локации при деформировании растяжением дают нетривиальную информацию о коллективных эффектах в системе дефектов.

В достаточно представительном (практически макромасштаба) объеме $\sim (9 \times 10 \times 0.3) \text{ mm}$ с числом характерных структурных элементов $\sim 1.5 \cdot 10^6$ оказалось возможным проследить как формирование ансамбля дефектов в одной локальной области образует в теле гетерогенность нового масштаба. В условиях совместности деформирования это по существу качественно изменяет структуру объекта на более высоком масштабном уровне, вследствие чего и происходит „макро“ перераспределение напряжений. Это проявление одного и того же релаксационного механизма перераспределения напряжений, но уже не только локального масштаба, а следующего, более высокого масштабного уровня. Будущая область макроразрыва в такой ситуации никак жестко не связана с накопленными на предыдущих этапах мезотрещинами, причем в ней отсутствует иерархия нарастания размеров коррелированно возникающих мезотрещин; она формируется достаточно „случайным“ образом в результате попеременного активного образования группы (ансамбля) мезотрещин в разных локальных областях на фоне прогрессирующего под действием нагрузки сокращения диссипативной способности окружающего объема. В целом процесс накопления микро/мезо разрушений контролируется не „упругим“ (линейным), а релаксационным механизмом перераспределения локальных напряжений. Ансамбль коррелированно рождающихся трещин не является ни

необходимым и ни достаточным условием образования магистральной трещины.

В случае множественного образования микро/мезотрещин при статическом деформировании гетерогенной системы зарождение магистральной трещины и тем более финальный акт макроразрушения происходят там и тогда, когда при заданных условиях деформирования исчерпывается возможность перераспределения поля напряжений между областями более высокого масштабного уровня.

Список литературы

- [1] *Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е.* Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.
- [2] *Kraus R., Payer A., Wilke W.* // J. Material. Sci. 1993. Vol. 28. P. 4047–4052.
- [3] *Raj B., Moorthy V.* // Transactions of the Indian Institute of Metals. 1996. Vol. 49. N 4. P. 277–302.
- [4] *Tamuzs V.P., Petrova V.E.* // Intern. Appl. Mechan. 2002. Vol. 38. N 10. P. 1157–1177.
- [5] *Куксенко В.С.* // ФТТ. 2005. Т. 47. Вып. 5. С. 788–792.
- [6] *Ботвина Л.Р.* Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. М.: Наука, 2008. 334 с.
- [7] *Лексовский А.М., Баскин Б.Л., Горенберг А.Я.* и др. // ФТТ. 1983. Т. 25. № 4. С. 109.
- [8] *Kytopoulos V.N.* // J. of Rein. Plast. Compos. 2004. Vol. 23. N 12. P. 1325–1349.
- [9] *Лексовский А.М., Баскин Б.Л.* // ФТТ. 2011. Т. 53. Вып. 6. С. 1223–1233.
- [10] *Lei Jun, Zhang Chuanzeng, Yang Qingsheng et al.* // Intern. J. of Fract. AUG. 2010. Vol. 164. N 2. P. 271–283.
- [11] *Khoshhravan Mohammadreza, Mehrabadi Farhad Asgari* // Intern. J. Adhesion and adhesives. DEC. 2012. Vol. 39. P. 8–14.
- [12] *Ефремов М.И., Ржевкин В.Р.* и др. // В кн.: Акустическая эмиссия материалов и конструкций. Ростов-на-Дону. 1984. Ч. 1. С. 139–140.
- [13] *Лексовский А.М., Гаврилин А.В., Баскин Б.Л.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 5. С. 46–53.
- [14] *Leksovskij F., Baskin B.L., Tichkin A.P., Abdulmanov A.* // Sol. Stat. Phenomena. 2008. Vol. 137. P. 9–14.
- [15] *Tishkin A.P., Gubanova G.N., Leksowski A.M., Yudin V.E.* // J. of Mater. Sci. 1994. Vol. 29. P. 632–639.
- [16] *Tishkin A.P., Leksowski A.M.* // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 8. С. 636–638.
- [17] *Брагинский А.П., Виноградов А.Ю., Лексовский А.М.* // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 9. С. 459–460.
- [18] *Leksovskii A.* Chapter in book „Acoustic emission“ / Ed. W. Sikorski. InTech. 2012. P. 295–316.