

УДК 620.179:534.6

Филоненко С.Ф., Калита В.М., Нимченко Т.В.
Национальный авиационный университет. Украина, Киев

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ХРУПКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Анотація

Розглянуто результати обробки сигналів акустичної емісії при руйнуванні композиційних матеріалів. Показано, що при зростанні швидкості прикладання навантаження відбувається зростання амплітуди реєстрованих сигналів і зменшення їх тривалості. При цьому площа сигналів залишається постійною величиною. Визначено, що задній фронт сигналів добре описується експоненціальною функцією. За аналізом форми сигналів показано, що процес руйнування починає розвиватися за термоактиваційним механізмом з переходом до механічного руйнування.

Abstract

The results of acoustic emission signal processing are reviewed at destruction of composite materials. It is shown that at ascending speed of application load there is ascending amplitude of registered signals and decreasing of their duration. Thus the area of signals by remains a constant. It is determined, that the back edge of signals is well described by an exponential function. From the analysis of waveform is shown that the process of destruction starts to develop on thermoactivation gear with transition to mechanical destruction.

Введение

При изучении явления акустической эмиссии (АЭ) внимание уделяется не только экспериментальным, но и теоретическим исследованиям. Прежде всего, это относится к моделям сигналов АЭ, формируемых при разрушении материалов. Разработанные модели [1–4] основаны на представлениях механики разрушения о процессах, происходящих в структуре материалов при их деформировании — процессы хрупкого и пластичного разрушения. Рассматриваемые модели дают представление о закономерностях акустического излучения, информативности параметров сигналов АЭ и их взаимосвязи с параметрами развивающихся процессов. При этом не рассматривается специфика структуры деформируемых материалов.

Особый интерес представляет изучение АЭ при разрушении композиционных материалов. Для описания разрушения композитных материалов часто рассматривают модель, в которой мате-

риал представлен в виде пучка волокон [5–7]. При этом разрушение такого материала на растяжение рассматривается как процесс последовательного разрушения волокон. Такая модель разрушения композиционных материалов положена в основу АЭ модели, рассмотренной в работах [8, 9]. С учетом выведенного соотношения для скорости изменения волокон, остающихся в процессе разрушения, и предположения того, что упругая энергия, запасенная в одиночном волокне, с некоторым коэффициентом пропорциональности (являющимся константой) высвобождается в виде энергии АЭ события получено аналитическое выражение для скорости высвобождения энергии событий АЭ. При этом было показано, что

$$\frac{de_{fa}(t)}{dt} \sim \frac{1}{\left(1 - \frac{t}{t_f}\right)^{\frac{p+1}{p}}}, \quad (1)$$

где e_{fa} — энергия акустического излучения; t_f — время полного разрушения материала; p — эмпирический параметр.

Результаты, полученные в [8, 9], показали, что с приближением к полному разрушению композиционного материала происходит возрастание интенсивности АЭ. Авторы работ [8, 9] отмечают, что их теоретические исследования согласуются с результатами экспериментальных данных, приведенных в работах [10, 11]. Однако следует отметить, что разработанная модель описывает АЭ только на стадии приближения к полному разрушению образца, так как в момент времени $t = t_f$ согласно выражения (1), наблюдается разрыв функции производной энергии АЭ. Такая неопределенность обусловлена принятыми в этих работах допущениями. В результате авторам так и не удалось теоретически получить сигнал АЭ в процессе полного разрушения композиционного материала.

В работе [12] рассмотрена модель сигнала АЭ при разрушении композиционного материала, также представленного в виде разрушаемого пучка волокон. В основу этой модели положен кинетический механизм развития процесса разрушения. В соответствии с кинетической теорией [13, 14] время разрушения каждого элемента определялось с использованием формулы Журкова

$$\tau = \tau_0 e^{\left(\frac{U_0 - \gamma \sigma(t)}{kT} \right)}, \quad (2)$$

где τ_0 – параметр, совпадающий по порядку величины с периодом тепловых колебаний атомов решетки твердого тела; U_0 – начальная энергия активации (величина начального энергетического барьера) процесса разрушения; $\sigma(t)$ – напряжение в материале, обусловленное механической нагрузкой, уменьшающее энергию активации, активирующее процесс разрушения и создающее его направленность; k – постоянная Больцмана; T – температура; γ – структурно чувствительный коэффициент (характеристика чувствительности материала к напряжению).

В работе [12] было учтено, что скорость развития процесса разрушения $v \approx \tau^{-1}$. Для случая нагружения материала с постоянной скоростью в приближении неизменной величины структурного фактора, а также в приближении отсутствия взаимодействия между волокнами в [12] было получено аналитическое выражения для сигнала АЭ, который имеет вид

$$U(t) = u_0 \alpha t e^{-\chi(t_0 - t)} e^{-\frac{1}{\tau_0 \chi} (e^{-\chi(t_0 - t)} - e^{-\chi t_0})}, \quad (3)$$

где u_0 – максимально возможное смещение при мгновенном разрушении образца; $\chi = \frac{\gamma \alpha}{kT}$; $t_0 = \frac{U_0}{\gamma \alpha}$; α – скорость изменения нагрузки.

Моделирование сигналов АЭ, в соответствии с выражением (3), позволило определить влияние скорости приложения нагрузки на трансформацию формы сигналов. При этом было выявлено влияние температурной активации, которая при возрастании скорости приложения нагрузки приводит к разрушению композитного материала при меньшем абсолютном значении нагружающего напряжения, а значит и более "раннем" (при менее напряженном образце) появлении сигналов АЭ. В этой модели возрастание скорости нагружения приводит к увеличению амплитуды и крутизны переднего фронта сигналов АЭ, а также к уменьшению их длительности.

В настоящей работе с целью проверки модельных представлений о разрушении композиционного материала как набора элементов, к которому применима теория Журкова, будут рассмотрены результаты экспериментальных исследований сигналов АЭ при разрушении образцов композиционных материалов из твердых сплавов. Будут проанализированы сигналы АЭ, полученные при разных скоростях нагружения. Получено, что данные экспериментов хорошо согласуются с теорией.

Методика и результаты исследований

Одним из классов композиционных материалов, представляющих собой матрицу с армирующим компонентом (наполнителем), которые изготавливаются методом спекания, являются материалы на основе вольфрама-кобальта [15, 16]. Изделия из данных материалов, например, твердосплавные резцы, широко используются при черновой и чистовой обработке разнообразных поверхностей (фрезерование, резание, сверление). В процессе работы в зоне контактного взаимодействия композиционного материала с обрабатываемой поверхностью [16] могут возникать значительные растягивающие напряжения. Это приводит к развитию микро и макротрещин и, в конечном итоге, к разрушению композиционного материала.

Для проведения исследований были изготовлены образцы из твердого сплава марки ВК4. Образцы имели форму круглой пластины с размерами: толщина – 4 мм; диаметр 8 мм. На каждой пластине на расстоянии 2 мм от одного из ее краев был сделан одиночный надрез (рис. 1, а). Надрезы были нанесены электроискровым способом и имели одинаковые размеры: ширина – 0,1 мм; глубина – 1,5 мм.

Испытания образцов проводили на универсальной испытательной машине FP-10 с электрическим приводом. Для проведения испытаний было изготовлено специальное приспособление, в котором осуществлялось жесткое закрепление образца на неподвижной опоре (рис. 1, б), а нагрузка P на образец обеспечивалась с использованием пуансона, перемещаемого в вертикальной плоскости. Нагрузка прикладывалась к краю мень-

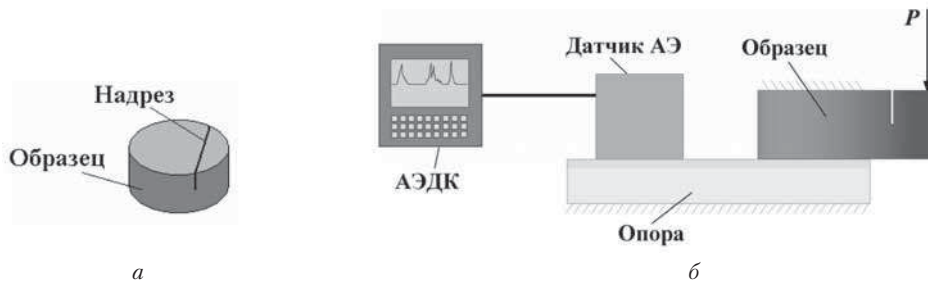


Рис. 1. Общий вид образцов из сплава ВК4 с электроискровым надрезом (а) и схема нагружения образца (б)

шей плоскости образца за надрезом (рис. 1, б) в пределах одного миллиметра от его края. Геометрические параметры закрепления образца и приложения нагрузки выбирались таким образом, что в зоне устья надреза создавались максимальные растягивающие напряжения. На нижней опоре приспособления, через слой акустопрозрачной смазки, устанавливался датчик АЭ (рис. 1, б). Сигналы АЭ с выхода датчика регистрировались и обрабатывались акустоэмиссионным диагностическим комплексом (АЭДК), который построен на базе персонального компьютера (ПК) (рис. 1, б). Программное обеспечение АЭДК позволяет хранить исходные сигналы АЭ, регистрируемые во времени, обрабатывать и анализировать основные их параметры (амплитуду, энергию, длительность и т.д.), а также транслировать данные в форматы математических приложений под Windows. Обработка полученных данных представлялась в цифровом и графическом видах. Общий вид специального приспособления (с испытываемым образцом и датчиком АЭ), которое установлено в захватах испытательной машины FP-10, показан на рис. 2.

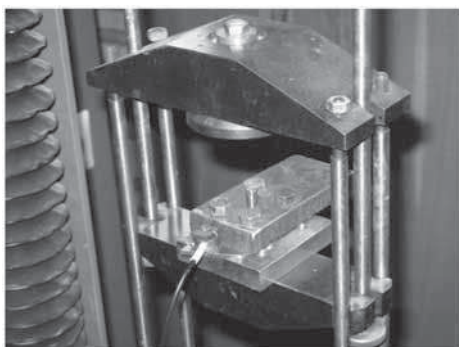


Рис. 2. Общий вид приспособления с испытываемым образцом и датчиком акустической эмиссии, которое установлено в захватах испытательной машины FP-10

Испытания образцов на разрушение осуществляли при постоянной скорости ввода нагрузки, когда перемещение траверсы машины FP-10 осуществляется равномерным ее перемещением во времени $x = \alpha t$, где x — величина перемещения траверсы; α — скорость ее перемещения; t — время. Эксперименты проводились при трех разных значениях скорости: $\alpha = 1$ мм/мин, $\alpha = 5$ мм/мин, $\alpha = 10$ мм/мин. Для устранения сигналов, возникающих в результате трения в сопрягающих элементах, регистрация АЭ осуществлялась после предварительного нагружения образца. Уровень предварительной нагрузки на образец составлял 20 кГ. Процесс записи сигналов АЭ прекращался после разрушения образца.

Результаты исследований

Исследования, проведенные в соответствии с разработанной методикой, показали, что не зависимо от скорости нагружения разрушение образцов с надрезом происходит практически при близких значениях приложенной нагрузки. Акустическое излучение, регистрируемое в процессе испытаний, имеет однотипный характер. На рис. 3 приведены временные зависимости сигналов АЭ, регистрируемых в экспериментах, при трех скоростях перемещения траверсы. Начало процесса разрушения характеризуется мгновенным возникновением сигналов АЭ, амплитуда которых практически непрерывно уменьшается по мере разрушения образцов. Из рис. 3 видно, что несмотря на различие скорости в 10 раз сигналы АЭ являются сходными. При этом анализ параметров сигналов показал, что они имеют одинаковую площадь. Это означает, что используемое в [12] и других работах предположение о том, что композиционный материал при его разрушении можно представлять как совокупность элементов (или в некоторых случаях волокон) является оправданным.

При возрастании скорости нагружения происходит уменьшение времени до разрушения образца и, как следствие, времени появления сигналов АЭ. Определим время t_p , когда происходит мгновенное возрастание амплитуды, которое соответствует времени начала процесса разрушения. Так, при скорости перемещения траверсы испытательной машины 1 мм/мин время до разрушения образца от начала нагружения и, соответственно, время появления сигнала АЭ составляет $t_p = 14315,06$ мс. Для скорости 5 мм/мин — это время составляет $t_p = 3092,39$ мс, а для скорости 10 мм/мин — $t_p = 1567,47$ мс. Однако следует отметить ряд принципиально важных моментов.

Величина перемещения траверсы испытательной машины до начала разрушения образца при скорости $\alpha = 1$ мм/мин составляет $x_p = 0,2386$ мм. При скорости $\alpha = 5$ мм/мин величина перемещения траверсы составляет $x_p = 0,2577$ мм, а при скорости $\alpha = 10$ мм/мин величина ее перемещения составляет $x_p = 0,2612$ мм. Другими словами, как и ожидалось из термоактивационной теории, о чем говорилось во введении, при увеличении скорости нагружения процесс разрушения образца и сигналы АЭ, сопровождающие данный процесс, возникают при большем значении величины нагрузки, т.е. при большем значении x_p . Различия в величинах x_p не превышает 10%. Примерно такое же (~10%) различие в абсолютных значениях x_p будет получено из выражений (3), если скорость нагрузки изменить в 10 раз.

Из экспериментальных (рис. 3) видно, что амплитуда сигналов АЭ и их длительность также

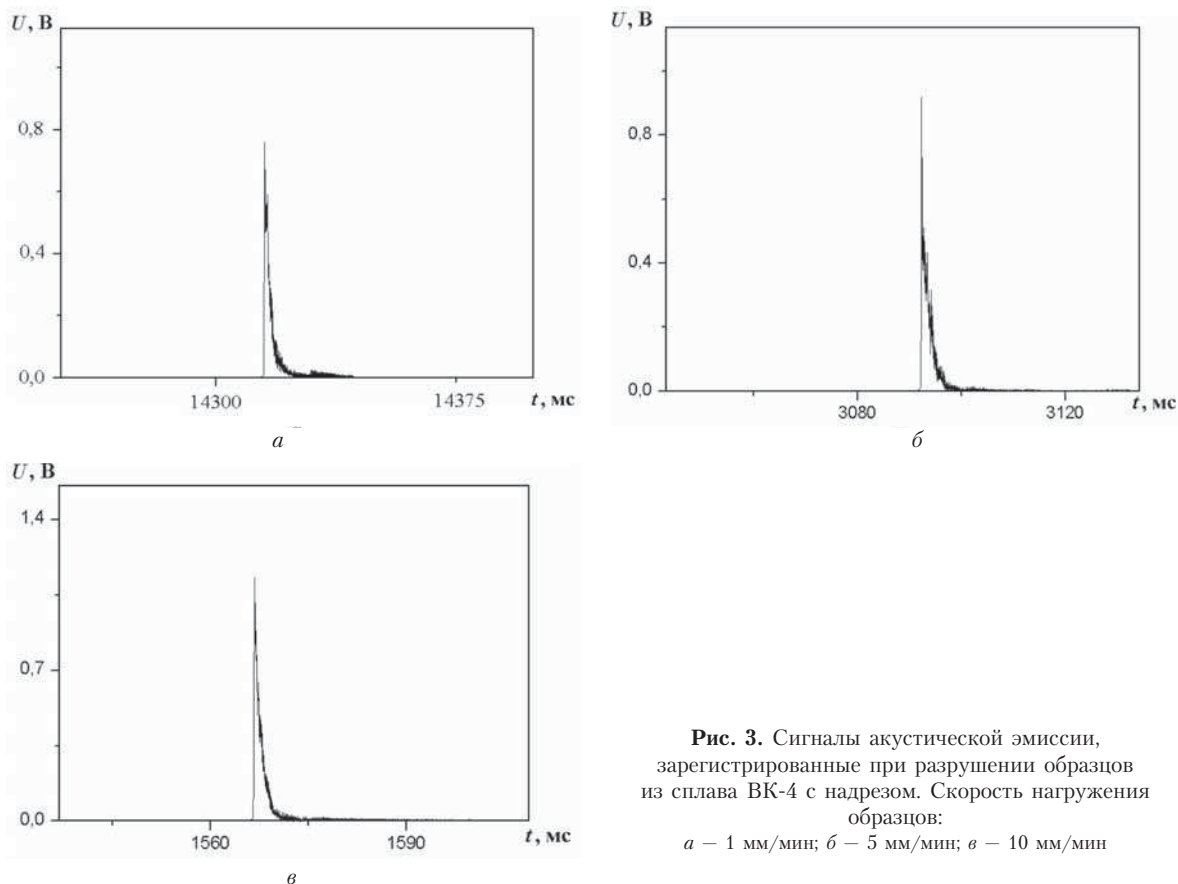


Рис. 3. Сигналы акустической эмиссии, зарегистрированные при разрушении образцов из сплава ВК-4 с надрезом. Скорость нагружения образцов:
 а – 1 мм/мин; б – 5 мм/мин; в – 10 мм/мин

зависят от скорости α ввода нагрузки. С возрастанием скорости нагружения уменьшается длительность регистрируемого сигнала АЭ. Так при скорости нагружения 1 мм/мин длительность регистрируемого сигнала АЭ составляет $\tau_p = 1,72$ мс. При скорости 5 мм/мин ее величина составляет $\tau_p = 1,51$ мс, а при скорости 10 мм/мин – $\tau_p = 1,22$ мс. С возрастанием скорости нагружения происходит возрастание и амплитуды регистрируемых сигналов АЭ. Так при скорости нагружения 1 мм/мин амплитуда регистрируемого сигнала АЭ составляет $U_p = 0,79$ В. При скорости 5 мм/мин ее величина составляет $U_p = 0,93$ В, а при скорости 10 мм/мин – $U_p = 1,14$ В.

Выражение (3) для сигнала АЭ, как отмечено выше, было получено для случая нагружения материала с постоянной скоростью, а также в приближении неизменной величины структурного фактора и без учета взаимодействия между волокнами. Из этого выражения, согласно проведенным расчетам, следует, что увеличение скорости нагружения в 10 раз должно сопровождаться возрастанием амплитуды сигнала АЭ также в 10 раз. При таком условии увеличения скорости должно происходить и уменьшение длительности

сигнала АЭ также в 10 раз. Однако в результатах экспериментальных исследований наблюдается значительное меньшее изменение амплитуды и длительности регистрируемых сигналов АЭ. Так, испытания образцов ВК-4 показывают, что с возрастанием скорости приложения нагрузки в 5 раз амплитуда сигнала АЭ возрастает в 1,17 раза, а длительность уменьшается в 1,14. При возрастании скорости приложения нагрузки в 10 раз амплитуда сигнала АЭ возрастает в 1,22 раза, а его длительность уменьшается в 1,44 раза. При этом следует отметить, что результаты экспериментальных исследований показали, что сигналы АЭ имеют форму, которая отличается от формы сигналов, описываемых аналитическим выражением (3). Временные зависимости модельных сигналов АЭ, полученные с использованием выражения (3), приведены в [12]. В работе [12] было показано, что с возрастанием скорости приложения напряжения происходит трансформация формы сигнала АЭ с исчезновением акселерационного характера роста его амплитуды. Однако по мере приближения к полному разрушению форма сигнала переходит форме с релаксационным спадом амплитуды заднего фронта. В экспериментальных

данных, полученных при испытании образцов из сплава ВК-4, регистрируемые сигналы АЭ имеют иную форму, которая показана на (рис. 3). Из рис. 3 видно, что на начальной стадии наблюдается почти мгновенный акселерационный рост амплитуды. Это хорошо видно при большем временном разрешении. Однако в общем случае, сигнал имеет характерный вид релаксационного падения амплитуды во времени. При этом на заднем фронте сигнала наблюдается некоторая его изрезанность.

На рис. 4, *а* показан типичный график зависимости изменения амплитуды заднего фронта сигнала АЭ, зарегистрированного при нагружении образца ВК-4 со скорости 10 мм/мин, а на рис. 4, *б* показана эта же зависимость, полученная при усреднении по 250 точкам результатов измерений. Из рис. 4 видно, что задний фронт сигнала АЭ имеет явно выраженный релаксационный характер изменения амплитуды, близкий к экспоненциальному закону. Полученные результаты показывают, что выражение (3), полученное в модели невзаимодействующих элементов и постоянного значения структурного фактора в выражении (2), может удовлетворительно описать форму сигналов АЭ только при больших значениях скоростей нагружения. Другими словами, модельные ограничения на параметры, заложенные в формуле Журкова (2), применимы только при больших скоростях нагружения. Однако следует отметить, что использование выражения (3) позволяет правильно предсказать закономерности изменения параметров сигналов АЭ при возрастании скорости нагружения.

При обработке экспериментальных АЭ данных возможно определить каким образом изменяется параметр τ в процессе развития разрушения. Для

этого была построена функция $f(t)$, которая представляет собой зависимость логарифма амплитуды сигнала АЭ от времени

$$f(t) = \ln(\bar{U}(t)/\bar{U}(t_p)), \quad (4)$$

где $\bar{U}(t)$ — амплитуда сигнала АЭ после выполнения операции усреднения.

График зависимости $\bar{U}(t)$ приведен на рис. 4, *б*. Функция $f(t)$ нормирована на максимальное значение амплитуды $\bar{U}(t_p)$, значение которой отвечает времени t_p . Ход временной зависимости амплитуды сигнала, согласно (4), приведен на рис. 5, *а*. Из рис. 5, *а* видно, что зависимость натурального логарифма амплитуды сигнала АЭ от времени имеет два линейных участка. На рис. 5 эти участки разделяет точка *А*, в которой происходит изменение наклона кривой логарифмической зависимости. На рис. 5, *б* более крупно показан участок I линейной зависимости логарифма амплитуды от времени, а на рис. 5, *в* показан участок II этой зависимости. При построении графиков на рис. 5, *б* началом отсчета времени принято время начала разрушения образца $t_0 = t_p$, а при построении графика рис. 5, *в* началом отсчета времени принято время, соответствующее положению точки *А*, показанной на рис. 5, *а*, т.е. $t_0 = t_A$. Точка *А* на рис. 5, *а* отвечает времени пересечения аппроксимирующих прямых линий участков I и II. Значение времени, соответствующее положению точки *А*, равно $t_A = 1569,6029$ мс.

Аппроксимирующие прямые зависимостей, приведенных на рис. 5, *б* и рис. 5, *в*, описываются линейными функциями, и для этих участков можно записать

$$\ln(\bar{U}) = A + Bt, \quad (5)$$

где A и B — коэффициенты.

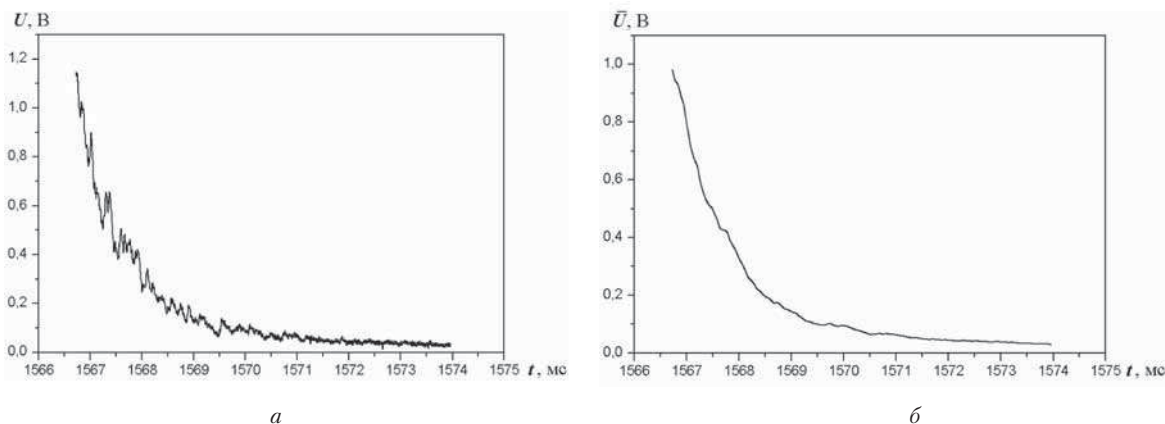
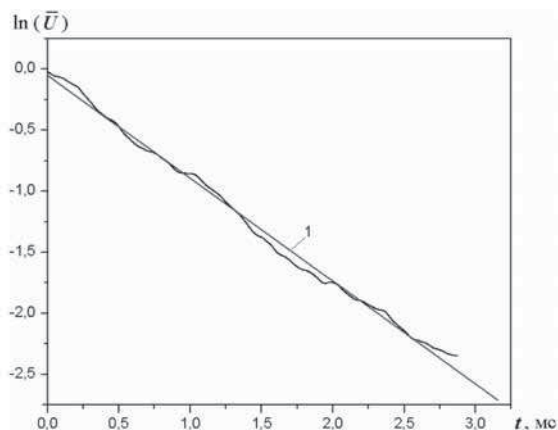


Рис. 4. Зависимости изменения амплитуды заднего фронта сигнала АЭ, начиная с максимального значения амплитуды зарегистрированного сигнала:

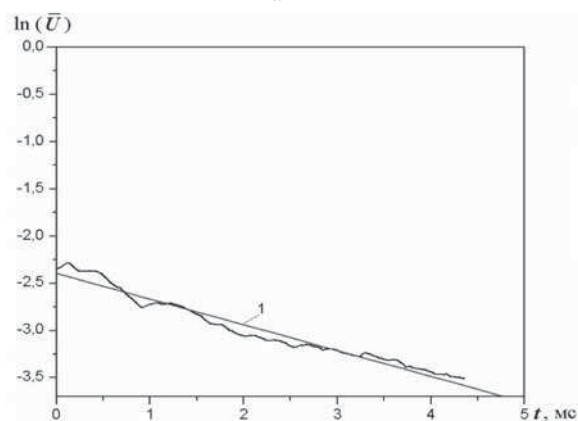
а — для исходного сигнала АЭ при скорости нагружения 10 мм/мин; *б* — усредненная зависимость для данных, показанных на рис. 4, *а*, с усреднением по 250 точкам измерений



а



б



в

Рис. 5. Зависимости изменения натурального логарифма амплитуды заднего фронта сигнала АЭ во времени:

а — зависимость, соответствующая данным, приведенным на рис. 4, б; б — участок I зависимости, приведенной на рис. 5, а; в — участок II зависимости, приведенной на рис. 5, а. А — точка разделения участков I и II. 1 — прямые, аппроксимирующие экспериментальные данные

Для рис. 5, б значения коэффициентов A и B , соответственно, равны: $A = -0,0477$; $B = -0,844$. При этом дисперсия для вероятности $p = 0,9986$ составляет $s = 0,0486$. Для рис. 5, в значения коэффициентов A и B , соответственно, равны: $A = -2,3932$; $B = -0,273$. При этом дисперсия для вероятности $p = 0,9878$ составляет $s = 0,0688$. Аналогичные результаты получены и для скоростей нагружения образцов 1 мм/мин и 5 мм/мин. Существование аппроксимирующей зависимости согласно (5) свидетельствует о том, что амплитуда сигнала АЭ, изменяется практически по экспоненциальному закону.

Из полученных результатов следует, что в экспериментальных исследованиях при развитии процесса разрушения время τ , которое для элементов композиционного материала может определяться формулой Журкова (2), оказывается постоянным в пределах участков I и II, разделенных точкой А (рис. 5, а). Возможно, что при развитии процесса разрушения параметр γ не является постоянной величиной, т.е. можно допустить, что его значение не остается постоянным, как это предполагалось в теории, согласно [12]. Собственно сценарий развития трещины, ее

подростание и раскрытие предполагает, что структурный фактор может изменяться во времени. Кроме этого, из результатов анализа логарифмической зависимости для амплитуды сигнала АЭ, приведенных на рис. 5, следует, что в ходе разрушения (но никак не до его начала) показатель в экспоненте в формуле (2) остается постоянным, то есть постоянной должна быть разность $U_0 - \gamma(t)\sigma(t)$. И здесь уже предполагается, что структурный фактор зависит от времени.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают правомочность часто используемого при разрушении композиционных материалов приближения в описании процесса разрушения как процесса последовательного разрушения элементов (волокон). Результаты экспериментальных данных, полученные при разрушении образцов с различной скоростью ввода нагрузки, согласуются с термоактивационной теорией разрушения Журкова. Эта теория, используемая при построении модели сигналов АЭ [12], предсказывала возрастания абсолютной величины нагрузки при возрастании скорости

ввода нагрузки. Однако оказалось, что предложенная в [12] модель позволяет описать форму сигнала только при больших скоростях нагружения. Это обусловлено тем, что теория Журкова была хорошо апробирована на образцах с более совершенной структурой, чем композитный материал. Из результатов проведенных исследований видно, что кроме термоактивационного механизма разрушения композитного материала важными являются механические факторы, которые оказывают влияние на развитие процесса разрушения. Например, на параметр структурного фактора в формуле Журкова.

Литература

1. Иванов В.И. Акустическая эмиссия в процессе когерентного разрушения // Доклады АН СССР, 1986. — т. 287. — № 2. — С. 302–306.
2. *Dislocation unpinning model of acoustic emission alkali halide crystals* /B.P Chandra., A.S. Gour, V.K. Chandra, Y. Patil // *Pramana -J.of physics*-2004. — v. 62. — № 6. — P. 1281–1292.
3. Бабак В.П., Филоненко С.Ф., Калита В.М. Модели формирования сигналов акустической эмиссии при деформировании и разрушении материалов // *Технологические системы*, 2002. — № 1(12). — С. 26–34.
4. Babak V.P., Filonenko S.F., Kalita V.M. Model of acoustic emission signal at self-accelerated crack development // *Aviation*, 2005. — v.IX. — № 2. — P. 3–8.
5. Curtin W.A. Theory of mechanical properties of ceramic-matrix composites//*J.Am.Ceram.Soc.* — 1991. — v. 75. — P. 2837–2845.
6. Newman W.I., Phoenix S.L. Time dependent fiber-bundles with local load sharing // *Phys. Rev. E.* — 2001. — v.63. — 021507.
7. Lyakhovskiy V., Ben-Zion Y., Agnon A. Distributed damage, faulting and friction// *J. Geophys.* — 1997. — v. 102. — No 27. — P.635–649.
8. Shcherbakov R. On modeling of geophysical problems/ A dissertation for degree of doctor of philosophy (Cornell university). — 2002. — 209 P.
9. Turcotte D.L., Newman W.I., Shcherbakov R. Micro and macroscopic models of rock fracture // *Geophys. J. Intern.* — 2003. — v. 152. — No 3. — P. 718–728.
10. Guarino A., Garcimartin A., Ciliberto S. An experimental test of the critical behavior of fracture precursors // *Europ. Phys. J.* — 1998. — B6. — P. 13–24.
11. Johanson A., Sornette D. Critical ruptures // *Europ. Phys. J.* — 2000. — B18. — P.163–181.
12. Филоненко С.Ф., Калита В.М., Нилченко Т.В. Модель формирования сигнала акустической эмиссии при разрушении композиционного материала// *Технологические системы*, 2009. — № 2(46). — С. 17–25.
13. Маламедов И.М. Физические основы надежности. — Л.: Энергия, 1970. — 152 с.
14. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. — М.: Наука, 1974. — 560 с.
15. Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов. — М.: Мир, 1982. — 232 с.
16. Новиков Н.В., Майстренко А.Л., Кулаковский В.Н. Сопротивление разрушению сверхтвердых материалов. — К.: Наукова думка, 1993. — 220 с.