



УДК 620.179:534.6

Филоненко С.Ф., Нимченко Т.В., Косицкая Т.Н.
 Национальный авиационный университет. Украина, Киев

ИНФОРМАТИВНОСТЬ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Анотація

Розглянуто параметри сигналу акустичної емісії, який формується при руйнуванні композиційного матеріалу. Встановлені теоретичні та експериментальні закономірності зміни параметрів сигналів акустичної емісії в залежності від швидкості навантаження матеріалу (швидкості розвитку процесу руйнування). Визначена інформативність параметрів сигналів акустичної емісії при руйнуванні композиційних матеріалів.

Abstract

There were considered characteristics of acoustic emission signal, which formed at destruction of composite materials. There were also determined theoretical and experimental regularities of the acoustic emission signals changes in dependence of materials loading speed (speed of development destruction process). In addition informativity characteristics of acoustic emission signals at destruction of composite materials was defined.

Постановка проблемы

Исследования по разрушению композиционных материалов представляют особый интерес. Это обусловлено тем, что композиционные материалы нашли широкое применение в различных областях техники: при обработке материалов, в авиационной и автомобильной промышленности, в строительстве и других [1–5]. Для изучения поведения композиционных материалов под нагрузкой и процессов их разрушения используется метод акустической эмиссии (АЭ) [6–8]. Его применение позволило исследовать ряд основных закономерностей изменения параметров АЭ и показало перспективность метода для диагностики изделий из композиционных материалов. Однако использование метода ограничено. Это обусловлено тем, что по экспериментальным данным сложно проводить оценки информативности параметров АЭ, так как, в значительной степени, они привязаны к условиям проведения экспериментов. Для решения данной задачи, безусловно, значение имеют теоретические исследования процессов разрушения композиционных материалов и процессов формирования акустического излучения.

Анализ последних исследований и публикаций

Одной из моделей, которая используется для описания процесса разрушения композитных материалов, является модель, согласно которой материал рассматривается в виде пучка разрушаемых волокон (fibre bundle model) [3, 9–13]. Такая модель разрушения композиционных материалов положена в основу модели АЭ излучения, рассмотренной в работах [14, 15]. В тоже время, в разработанной модели существуют противоречия. Непрерывность процесса разрушения композиционного материала, которая положена в основу модели АЭ, должна приводить к непрерывности АЭ излучения, и при полном разрушении материала должен формироваться одиночный сигнал АЭ. Однако такой сигнал АЭ отсутствует в разработанной модели, так как в момент времени t_p полного разрушения композиционного материала существует неопределенность или разрыв функции скорости изменения энергии АЭ. Поэтому АЭ модель реализуется приближение к полному разрушению. В качестве информативного параметра в такой модели рассматривается только накопленная (суммарная) энергия АЭ, что имеет согласование с результатами экспериментальных исследований [16, 17]. В тоже время, исходя из разработанной модели, невозможно оценить информативность других параметров АЭ излучения.

Модель разрушения композиционного материала, представленного в виде пучка волокон, положена и в основу построения модели сигнала АЭ, рассмотренной в работе [18]. Исследования, проведенные в работе, позволили получить аналитические выражения для зависимостей изменения числа оставшихся волокон и сигнала АЭ при развитии во времени процесса разрушения. При этом было показано, что непрерывность процесса разрушения композиционного материала приводит к формированию одиночного сигнала АЭ. Также были определены основные закономерности развития процесса разрушения и закономерности трансформации формы сигнала АЭ при изменении скорости разрушения и физико-механических характеристик материала. Экспериментальные результаты, полученные при разрушении композиционных материалов [19], показали хорошее согласование с результатами теоретических исследований.

В тоже время, наличие аналитического выражения для сигнала АЭ [18], формируемого в процессе разрушения композиционного материала, позволяет провести исследования основных закономерностей изменения параметров формируемого сигнала АЭ в зависимости от влияющих факторов.

Задачи исследования

В работе будут рассмотрены параметры сигнала АЭ, формируемого при разрушении композиционного материала, получены расчетные выражения и закономерности изменения параметров сигнала в зависимости от скорости нагружения материала (скорости развития процесса разрушения). Будет определена информативность параметров сигналов АЭ при разрушении композиционных материалов, а также проведено сопоставление теоретических результатов с результатами экспериментальных исследований.

Расчетные соотношения для определения значений параметров сигналов акустической эмиссии при разрушении композиционных материалов

Как было отмечено выше, в работе [18] рассмотрена модель сигнала АЭ, формируемого при разрушении композиционного материала, которая разработана с учетом кинетики развития процесса разрушения. Полученное аналитическое выражение, описывающее формируемый сигнал АЭ, имеет вид

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

где τ_0 — параметр, совпадающий по величине с периодом тепловых колебаний атомов решетке твердого тела; U_0 — начальная энергия активации (величина начального энергетического барьера) процесса разрушения; k — постоянная Больцмана; T — температура; γ — структурно чувствительный коэффициент (характеристика чувствительности материала к напряжению); α — скорость изменения приложенного напряжения; $\chi = \frac{\gamma \alpha}{kT}$; $t_0 = \frac{U_0}{\gamma \alpha}$;

$u_0 = \frac{N_0}{\tau_0} \beta \delta_s$ — максимально возможное смещение при мгновенном разрушении образца; N_0 — число разрушаемых элементов (волокон) в материале;

β — постоянная; $\delta_s = \int_{-\delta/2}^{\delta/2} a(\tau) d\tau$; $a(\tau)$ — функция,

определяющая форму сигнала, которая считается одинаковой для всех разрушаемых элементов, и которая имеет единичную амплитуду; δ — дли-

тельность импульса возмущения при разрушении одиночного элемента.

Сигнал АЭ, согласно (1), представляет собой одиночный импульсный сигнал. Для импульсного сигнала основными его параметрами являются [20]: длительность τ_m ; максимальная амплитуда U_{\max} ; энергия E ; мощность W ; площадь под огибающей сигнала S_U . В методе акустической эмиссии определение данных параметров рассмотрено в [21, 22].

Аналитические выражения для определения площади под огибающей сигнала АЭ, его энергия и мощность на интервале времени $[0, \tau_m]$, с учетом (1), будут иметь следующий вид

- площадь под кривой сигнала АЭ

$$S_U = \int_0^{\tau_m} U(t) dt = \int_0^{\tau_m} u_0 \alpha t e^{-\chi(t_0 - t)} e^{-\frac{1}{\tau_0 \chi} \chi t_0} dt, \quad (2)$$

- энергия сигналов АЭ

$$E = \int_0^{\tau_m} U^2(t) dt = \int_0^{\tau_m} [u_0 \alpha t e^{-\chi(t_0 - t)} e^{-\frac{1}{\tau_0 \chi} \chi t_0}]^2 dt, \quad (3)$$

- мощность сигналов АЭ

$$W = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau_m} U^2(t) dt = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau_m} [u_0 \alpha t e^{-\chi(t_0 - t)} e^{-\frac{1}{\tau_0 \chi} \chi t_0}]^2 dt, \quad (4)$$

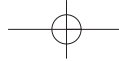
где τ_m — длительность сигнала АЭ, сформированного при разрушении композиционного материала.

Максимальную амплитуду сигнала АЭ при разрушении композиционного материала, согласно (1), определим по выражению

$$U(t = \tau_{m0}) = u_0 \alpha \tau_{m0} e^{-\chi(t_0 - \tau_{m0})} e^{-\frac{1}{\tau_0 \chi} \chi t_0} \quad (5)$$

где τ_{m0} — момент времени, соответствующий максимальной амплитуде сигнала АЭ.

Для решения уравнений (2), (3) и (4) в символьном виде и определения амплитуды сигнала АЭ, согласно (5), необходимо определить выражения для момента времени τ_{m0} , соответствующего максимальной амплитуде сигнала АЭ, и, связанную с ним, длительность сигнала АЭ τ_m .



Момент времени τ_{m0} определим из условия, что производная от функции $U(t)$, согласно (1), по времени в точке, соответствующей максимальной амплитуде сигнала АЭ, равна нулю

$$\left. \frac{\partial U(t)}{\partial t} \right|_{t=\tau_{m0}} = 0. \quad (6)$$

Проведя подстановку выражения (1) в (6), и проведя дифференцирование, получим

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial U(t)}{\partial t} \right|_{t=\tau_{m0}} &= u_0 \alpha e^{-\chi(t_0-\tau_{m0})} e^{\frac{-\chi(t_0-\tau_{m0})-e^{t_0\chi}}{\tau_0\chi}} + \\ &+ u_0 \alpha \tau_{m0} \chi e^{-\chi(t_0-\tau_{m0})} e^{\frac{-\chi(t_0-\tau_{m0})-e^{t_0\chi}}{\tau_0\chi}} - \\ &- \frac{u_0 \alpha \tau_{m0} e^{-2\chi(t_0-\tau_{m0})} e^{\frac{-\chi(t_0-\tau_{m0})-e^{t_0\chi}}{\tau_0\chi}}}{\tau_0} \Big|_{t=\tau_{m0}} = \\ &= u_0 \alpha e^{-\chi(t_0-\tau_{m0})} e^{\frac{-\chi(t_0-\tau_{m0})-e^{t_0\chi}}{\tau_0\chi}} \times \\ &\times \left(1 + \tau_{m0} \chi - \frac{\tau_{m0} e^{-\chi(t_0-\tau_{m0})}}{\tau_0} \right) \Big|_{t=\tau_{m0}} = 0. \quad (7) \end{aligned}$$

Исходя из выражения (7) можно записать

$$\left(1 + \tau_{m0} \chi - \frac{\tau_{m0} e^{-\chi(t_0-\tau_{m0})}}{\tau_0} \right) \Big|_{t=\tau_{m0}} = 0. \quad (8)$$

Решение уравнения (8) относительно τ_{m0} , не позволяет определить момент времени, соответствующий максимальной амплитуде сигнала АЭ, в явном виде. Аналогичным образом невозможно определить в явном виде и длительность сигнала АЭ τ_m . Поэтому решение уравнений (2)...(5) возможно провести только численными методами. Другими словами исследование закономерностей изменения параметров сигналов АЭ, с построением соответствующих зависимостей, можно провести численными методами. При этом необходимо задаться значениями параметров χ , τ_0 , t_0 , входящих в (1), а также определить значения τ_{m0} и τ_m .

Для проведения расчетов значение моментов времени τ_{m0} можно определить из графических зависимостей изменения амплитуды сигналов АЭ во времени, которые будут получены для заданных величин скорости α изменения приложенного напряжения. Длительности сигналов АЭ τ_m также могут быть определены из графических зависимостей изменения амплитуды сигналов АЭ во времени. Однако в связи с некоторым асимптотическим изменением амплитуды сигнала АЭ по заднему фронту длительность сигнала в процессе разрушения композиционного материала τ_m можно определить из условия вида

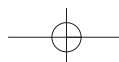
$$U(t = \tau_m) \ll U_{\max}(t = \tau_{m0}). \quad (9)$$

Поэтому при проведении численных расчетов будем полагать, что длительность сигнала АЭ равна $\tau_m = 2\tau_{m0}$. Такое значение длительности сигнала АЭ не противоречит результатам моделирования, полученным в работе [18].

Моделирование закономерностей изменения параметров сигналов акустической эмиссии

Как было отмечено выше, при проведении расчетов параметров сигналов АЭ, согласно выражений (2)...(5), формируемых при разрушении композиционного материала, и моделировании закономерностей изменения их величин от скорости приложенного напряжения значение α задавалась изменением параметром χ . Это обусловлено тем, что $\chi = \frac{\gamma\alpha}{kT}$, где γ , k , T — являются константами. При этом, как и в работе [18], параметры, входящие в выражение (1), приводятся к безразмерным величинам. Время нормируется на t_0 , χ нормируется на $\frac{\gamma}{kT}$, а амплитуда сигнала нормируется на u_0 . Соотношение величин χ и $1/\chi\tau_0$ выбирались исходя из того, что период собственных колебаний атомов вещества значительно меньше времени развития процесса разрушения (времени ввода напряжения), т.е. $(1/\chi\tau_0) \gg \chi$. При таких условиях значение $\tilde{\chi} = \alpha$ и изменялось в диапазоне величин от 100 до 250. Увеличение значения $\tilde{\chi}$ соответствует увеличению скорости приложения напряжения.

Расчеты проводились в два этапа, при условии, что величина $(1/\chi\tau_0)$ для начального значения $\tilde{\chi} = 100$ равна $(1/\chi\tau_0) = 10000000$. На первом этапе, для заданного значения $(1/\chi\tau_0)$ и $\tilde{\chi}$ проводились расчеты зависимости изменения амплитуды сигнала АЭ во времени, согласно (1), с заданным шагом приращения по времени. По результатам расчета строился график изменения амплитуды сигнала АЭ во времени в относительных единицах, т.е. график вида $\tilde{U}(t) = U(t)/u_0$. Одновременно формировалась двумерная таблица значений относительных амплитуд сигнала АЭ от времени. По таблице определялись максимальная амплитуда \tilde{U}_{\max} , момент времени $\tilde{\tau}_{m0}$, соответствующий данной амплитуде, и длительность $\tilde{\tau}_m = 2\tilde{\tau}_{m0}$ сигнала АЭ. На втором этапе, в соответствии с полученными данными, проводился расчет энергии \tilde{E} , мощности \tilde{W} и площади под огибающей сигнала \tilde{S}_U . Расчеты параметров сигнала АЭ проводились на интервале времени, равном его длительности $\tilde{\tau}_m$. На следующем шаге осуществлялось изменение значения χ , с соответствующим пересчетом величины $(1/\chi\tau_0)$, и процедура расчетов повторялась.



Результаты проведенных расчетов, в виде зависимостей изменения параметров сигналов АЭ от скорости приложения напряжения в относительных единицах, а именно: $\tilde{U}_{\max}(\tilde{\chi})$; $\tilde{\tau}_m(\tilde{\chi})$; $\tilde{E}(\tilde{\chi})$ и $\tilde{W}(\tilde{\chi})$, показаны на рис. 1. Из рис. 1 видно, что с возрастанием скорости приложения напряжения наблюдается возрастание амплитуды, энергии и мощности сигнала АЭ. Однако, если амплитуда сигнала увеличивается практически линейно (рис. 1, а), то энергия и мощность формируемого сигнала имеют нелинейный характер возрастания (рис. 1, в, з). В тоже время, с возрастанием прило-

женного напряжения наблюдается уменьшение длительности сигнала АЭ. Причем данное уменьшение длительности является нелинейным (рис. 1, б). Аппроксимация полученных данных показала, что зависимости изменения энергии, мощности и длительности сигналов АЭ хорошо описываются функцией вида

$$Y = m + r\tilde{\chi}^h, \quad (10)$$

где Y — исследуемый параметр АЭ (энергия, мощность, длительность); m , r , h — коэффициенты аппроксимирующего выражения.

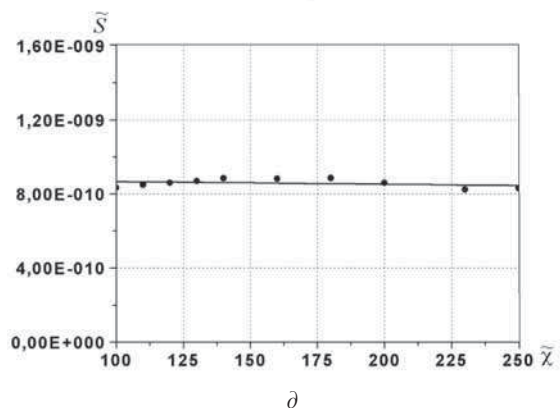
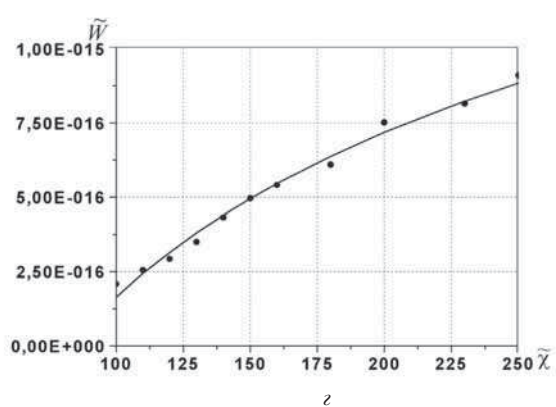
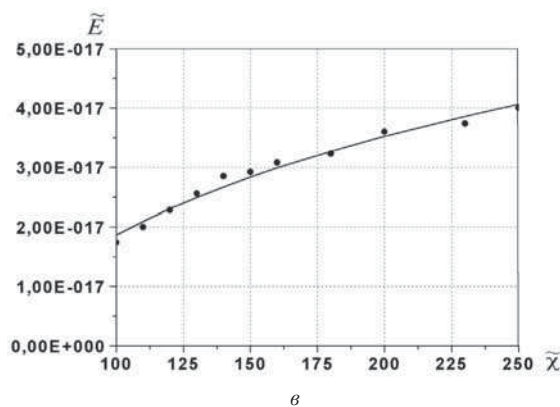
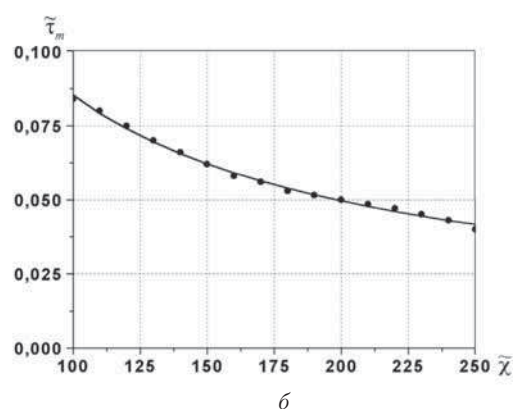
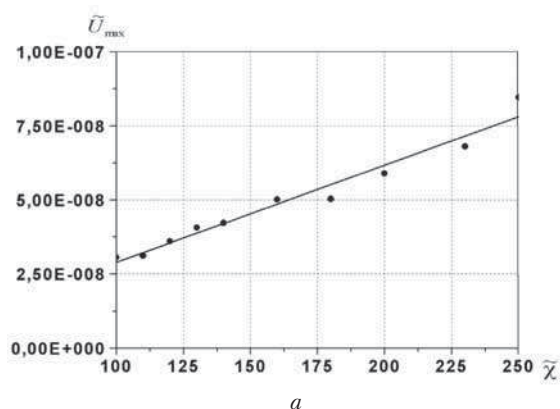


Рис. 1. Закономерности изменения параметров сигналов акустической эмиссии при разрушении композиционного материала в зависимости от скорости приложения напряжения $\tilde{\chi}$: а — максимальная амплитуда; б — длительность; в — энергия; з — мощность; д — площадь под огибающей сигнала. При проведении расчетов, в соответствии с выражениями (1)...(5), $(1/\chi\tau_0) = 10000000$, а $\tilde{\chi}$ изменялось от 100 до 250



Согласно полученным данным коэффициенты аппроксимирующего выражения (10) имеют следующие значения: для энергии АЭ — $m = -1,1122 \cdot 10^{-14}$, $r = 1,1031 \cdot 10^{-14}$, $h = 0,00215$; для мощности — $m = 4,7866 \cdot 10^{-14}$, $r = -5,1492 \cdot 10^{-14}$, $h = -0,01663$; для длительности — $m = 14,0609$, $r = -13,7647$, $h = 0,00335$. При этом дисперсия (стандартное отклонение) для заданной вероятности составляет: для энергии — $s^2 = 1,274 \cdot 10^{-36}$, $p = 0,9852$; для мощности — $s^2 = 6,3251 \cdot 10^{-34}$, $p = 0,9928$; для длительности — $s^2 = 2,4015 \cdot 10^{-6}$, $p = 0,9938$.

Нелинейность возрастания энергии и мощности сигнала АЭ при линейном возрастании амплитуды обусловлена влиянием длительности. Действительно, в расчетные выражения для энергии и мощности сигнала АЭ, согласно выражений (3) и (4), входит длительность сигнала, которая, исходя из рис. 1, б, с возрастанием скорости приложения напряжения имеет нелинейный характер изменения.

Очевидно, что при разрушении образцов композиционного материала заданного размера (сечения) под действием возрастающего напряжения размер образующихся трещин или их площадь должна быть постоянной величиной. Причем скорость приложения внешнего напряжения не должна влиять на размер образующейся трещины. Это означает, что параметрами сигналов АЭ или информативными параметрами, несущими информацию о параметрах образующихся трещин, являются параметры, которые не зависят от скорости приложения напряжения. В соответствии с результатами проведенного моделирования таким информативным параметром АЭ является площадь под кривой сигнала (рис. 1, д). Зависимость, приведенная на рис. 1, д описывается линейной функцией вида

$$\tilde{S} = d + q\tilde{\chi}, \quad (11)$$

где d , q — коэффициенты аппроксимирующего выражения, значения которых равны: $d = 8,338 \cdot 10^{-10}$, $q = -1,3196 \cdot 10^{-16}$.

При этом дисперсия для вероятности $p = 0,9632$ составляет $s^2 = 6,371 \cdot 10^{-28}$.

Экспериментальные закономерности изменения параметров сигналов акустической эмиссии

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. Надрезы были нанесены электроискровым способом и имели одинаковые размеры: ширина — 0,1 мм; глубина — 1,5 мм.

Образцы испытывались на сдвиг в специально изготовленном приспособлении. Однако геометрические параметры закрепления образца и приложения нагрузки выбирались таким образом, что в зоне устья надреза создавались максимальные растягивающие напряжения. Методика испытаний, схема их нагружения, методика регистрации и обработки сигналов АЭ рассмотрены в работе [19]. Испытания образцов проводили на разрывной машине ГР-10 при скоростях нагружения 1 мм/мин, 5 мм/мин и 10 мм/мин.

Полученные результаты показали, что с возрастанием скорости нагружения образцов наблюдается возрастание параметров регистрируемых сигналов АЭ. При этом амплитуда и длительность сигналов АЭ возрастает практически линейно, что видно из данных, приведенных в работе [19]. В тоже время, энергия и мощность сигналов возрастает не линейно (рис. 2, а, б). Зависимости изменения энергии и мощности сигналов АЭ от скорости нагружения описываются экспоненциальной функцией вида

$$y = ce^{b\alpha}, \quad (12)$$

где α — скорость нагружения; c , b — коэффициенты аппроксимирующего выражения.

Значения коэффициентов c и b для энергии и мощности сигналов АЭ равны: для энергии — $c = 0,37$, $b = 0,06$; для мощности — $c = 0,20$, $b = 0,09$. При этом дисперсия (стандартное отклонение) для заданной вероятности составляет: для энергии — $s^2 = 0,00002$, $p = 0,99932$; для мощности — $s^2 = 0,0001$, $p = 0,99807$.

Следует отметить, что ход экспериментальных зависимостей изменения энергии и мощности сигналов АЭ от скорости нагружения при разрушении композиционного материала ВК4 отличается от хода теоретических зависимостей. Экспериментальные зависимости имеют явно выраженный экспоненциальный характер изменения. Подобное различие в ходе изменения зависимостей энергии и мощности сигналов, вероятно, обусловлено тем, что кроме термоактивационного механизма разрушения композитного материала, который заложен в модель сигнала АЭ [18], важными, как отмечено в [19], являются механические факторы. Данные факторы, безусловно, оказывают влияние на развитие процесса разрушения. Например, параметр структурного фактора в формуле Журкова.

Результаты экспериментальных исследований также показали, что площадь под огибающей регистрируемых сигналов АЭ не зависит от скорости нагружения и практически остается постоянной величиной (рис. 2, в). Зависимость, приведенная на рис. 2, в, хорошо описывается линейной функцией вида

$$S = A + B\alpha, \quad (13)$$

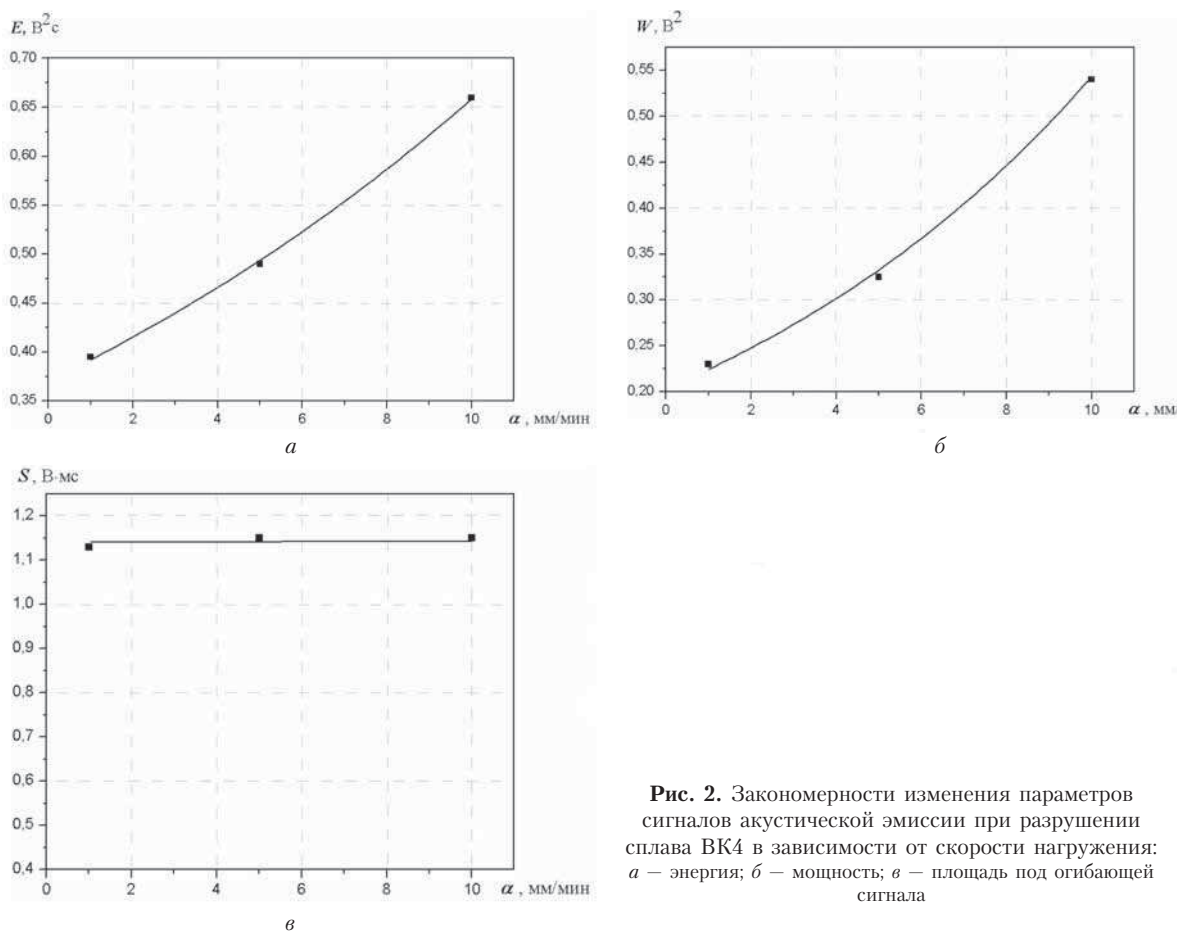


Рис. 2. Закономерности изменения параметров сигналов акустической эмиссии при разрушении сплава ВК4 в зависимости от скорости нагружения: *a* – энергия; *б* – мощность; *в* – площадь под огибающей сигнала

где A и B – коэффициенты, значения которых равны: $A = 1,14$; $B = 0,001$.

При этом дисперсия для вероятности $p = 0,9978$ равна $s^2 = 0,0045$.

Выводы

Результаты моделирования закономерностей изменения параметров сигналов АЭ при разрушении композиционных материалов, согласно разработанной модели, в зависимости от скорости нагружения показали следующее. С возрастанием скорости приложения напряжения амплитуда сигнала АЭ возрастает по линейному закону изменения. При этом длительность сигналов АЭ уменьшается, а энергия и мощность – возрастают. Однако уменьшение длительности, а также возрастание энергии и мощности происходит по не линейному закону. В тоже время, параметром, который не зависит от скорости приложения напряжения, является площадь под кривой сигнала АЭ. Она практически остается постоянной величиной. С учетом того, что для образцов одного и того же размера не зависимо от скорости

нагружения площадь разрушения (образующейся трещины) является постоянной, то, безусловно, информативным параметром сигналов АЭ является площадь под огибающей сигналов. Экспериментальные результаты, полученные при разрушении композиционного материала ВК4, показали, что амплитуда и длительность регистрируемых сигналов АЭ с увеличением скорости нагружения возрастают линейно. Однако энергия и мощность сигналов АЭ имеют экспоненциальный характер возрастания. При этом площадь под огибающей сигналов АЭ практически остается постоянной величиной, что имеет хорошее согласование с результатами теоретических исследований. В тоже время, различие в характере хода изменения теоретических и экспериментальных зависимостей энергии и мощности сигналов, вероятно, обусловлено тем, что кроме термоактивационного механизма разрушения композитного материала, который заложен в модель сигнала АЭ, важными являются механические факторы. Данные факторы, безусловно, оказывают влияние на развитие процесса разрушения. Поэтому исследование



преобладающего влияния термоактивационного и механического механизмов при развитии процесса разрушения представляется важным, с точки зрения оптимизации модели разрушения композиционных материалов, формируемых сигналов АЭ, закономерностей изменения их параметров для решения вопросов диагностики.

Литература

1. Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов. — М.: Мир, 1982. — 232 с.
2. Новиков Н.В., Майстренко А.Л., Кулаковский В.Н. Сопротивление разрушению сверхтвердых материалов. — К.: Наукова думка, 1993. — 220 с.
3. Raisal F. Fibre model for shear failure and plasticity /Zur erlangung der würde eines doktors der naturwissenschaften genehmigte abhandlung. Institut für computerphysik der universität Stuttgart, 2007. — 122 p.
4. Size dependency of tension strength in natural fibre composites/ G. Dill-Langer, R.C. Hidalgo, F. Kun at.al./Physica A. — 2003. — No325. —P. 547–560.
5. Stellbrink K.K.U. Micromechanics of composites: composite properties of fibre and matrix constituents.-Munich: Carl Hanser Verlung, 1996. — 210 p.
6. Акустико-эмиссионная диагностика степени поврежденности и прочности полимерных композиционных материалов /Библик И.В., Мелешкин М.Б., Музыка Е.И., Палаткин М.И. // Акустическая эмиссия гетерогенных материалов. Тематический сборник. — 1986. — С. 28–33.
7. Исследование разрушения стеклопластиков при малоциклическом нагружении методом акустической эмиссии /Гаврилов Д.А., Мелешкин М.Б., Музыка Е.И., Палаткин М.И., Супруненко В.А., Урбанский С.В. // Акустическая эмиссия гетерогенных материалов. Тематический сборник. — 1986. — С. 60–64.
8. Ржевский В.Р., Нарауллаев Г.Х. Определение прочностных параметров пучка волокон по данным акустической эмиссии // Акустическая эмиссия гетерогенных материалов. Тематический сборник. — 1986 — С. 73–76.
9. Tricritical behavior in rupture induced by disorder/ J.V. Andersen, D. Sornette, K. Leung//Phys. Rev.Lett. — 1997. — No78. —P. 2140–2143.
10. Fracture and second-order phase transition/ Y. Moreno, J.B. Gomez, A.F. Pacheco// Phys. Rev. Lett. — 2000. — No 85. — P. 2865–2668.
11. Pradham S., Chakrabarti B.K. Failure properties of fiber bundle models// Int.J. Mod. Phys.B — 2003. — No 17. — P. 5565–5581.
12. Pride S.R., Toussaint R. Thermodynamics of fibre bundles //Physica A. — 2002. — No 312. —P. 159–171.
13. Hemmer P.C. Hansen A. The distribution of simultaneous fiber failures in fiber bundles// J. Appl. Mech. — 1992. — No59. —P. 909–914.
14. Shcherbakov R. On modeling of geophysical problems/ A dissertation for degree of doctor of philosophy (Cornell university). — 2002. — 209 P.
15. Turcotte D.L., Newman W.I., Shcherbakov R. Micro and macroscopic models of rock fracture // Geophes. J. Intern. — 2003. — v.152. — No 3. — P. 718–728.
16. Guarino A., Ciliberto S, Garcimartin A. Failure time and microcrack nucleation // Europhys.Lett. — 1999. — v. 47. — P. 13–24.
17. Johanson A., Sornette D. Critical ruptures //Europ. Phys. J. — 2000. — B18. — P. 163–181.
18. Филоненко С.Ф., Калина В.М., Нимченко Т.В. Модель формирования сигнала акустической эмиссии при разрушении композиционного материала//Технологические системы, 2009. — № 2(46). — С. 17–25.
19. Филоненко С.Ф., Калина В.М., Нимченко Т.В. Закономерности изменения акустической эмиссии при разрушении хрупких композиционных материалов // Технологические системы, 2009. — № 3(47). — С. 27–33.
20. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. — М: Высшая школа, 1983. — 536 с.
21. ГОСТ 27655-88. Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения. //М.: Издво стандартов, 1988. — 15 с.
22. ASTM E 1316-94. Standart difinitions of terms relating to acoustic emissions.