

УДК 620.179:534.6

С.Ф. Филоненко¹, В.М. Калита², А.П. Космач¹, Т.Н. Косицкая¹¹ Национальный авиационный университет. Украина, г. Киев.² Национальный технический университет Украины «КПИ». Украина, г. Киев.

ВЛИЯНИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ПОРОГОВОГО ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА АКУСТИЧЕСКУЮ ЭМИССИЮ

Анотація

З використанням релаксаційної моделі руйнування композиційного матеріалу описано сигнали акустичної емісії з урахуванням нелінійності деформування композиційного матеріалу та граничного характеру зміни швидкості руйнування волокон в критичній області. Отримано аналітичні вирази для тимчасової зміни кількості зруйнованих елементів композита, а також вирази для сигналів акустичної емісії, що супроводжують руйнування елементів. Показано, що, навіть у випадку сильної нелінійності деформування, форма сигналів акустичної емісії практично не залежить від величини цієї нелінійності. Однак вона дуже чутлива до швидкості навантаження композиційного матеріалу.

Abstract

With usage the relaxational model of composite material destruction the acoustic emission signals with allowance of non-linearity deforming an aggregate and threshold nature of alteration destruction speed of fibres in a critical region are described. The analytical expressions for temporary change of number the broken down members of an aggregate, and also expression for acoustic emission signals accompanying destruction of members are obtained. It is shown that, even in case of strong non-linearity deforming, the waveform of an acoustic emission practically does not depend on value of this non-linearity. However she is hardly responsive to a loading rate of a composite material.

Постановка проблеми

Одним из методов диагностики композиционных материалов является метод акустической эмиссии (АЭ). Его практические возможности расширяют проведение исследований, направленных на установление закономерностей акустического излучения и определение факторов, влияющих на параметры АЭ. При этом важную роль имеют теоретические исследования. Построение адекватных моделей сигналов АЭ при деформиро-

вании и разрушении материалов представляется важным при разработке методов и критериев оценки опасности процессов, влияющих на несущую способность изделий. Такие модели, безусловно, должны основываться на физических процессах, происходящих при разрушении материалов, и если речь идет о композите, то в первую очередь следует учитывать особенности его структуры.

Анализ последних исследований и публикаций

Исследования процессов разрушения композиционных материалов в условиях одноосного растяжения и сдвига рассмотрены в [1–10]. В этих работах используется модельное приближение композита в виде пучка волокон (fiber bundle model). В наиболее простом случае предполагается, что волокна независимы, а их разрушение происходит последовательным образом при достижении порогового значения прочности. Это позволяет не учитывать влияния матрицы композиционного материала. Такое упрощение допустимо, если матрица является достаточно эластичной и ее прочность меньше прочности волокон, т.е. предполагается, что внешняя нагрузка сосредоточена на волокнах. Если прочность матрицы больше прочности волокон, то перечисленные условия не выполняются, и разрушение композита начнется с разрушения волокон. Таким образом, в [1–10] основным в разрушении композиционного материала принимают процесс разрушения связки (волокон). При этом также пренебрегают важными, но сильно усложняющими моделирование композита эффектами взаимодействия матрицы с волокнами, а также взаимодействие между волокнами. Эти приближения фактически сводят проблему описания разрушения композита к разрушению ансамбля волокон, когда важными являются, как их индивидуальные свойства, так и статистические свойства.

Приближение пучка волокон позволяет аналитически получить сигналы АЭ, как это было сделано в [11, 12]. В этих работах интенсивность АЭ связывали со скоростью процесса разрушения волокон и высвобождаемой при этом упругой энергией. Однако в этих работах рассматривалась область деформирования, когда полного разрушения

композита не происходит, т.е. изучалась АЭ до порогового разрушения части волокон. Собственно подход, используемый в этих работах, не позволял дойти до критической области, поскольку аналитическое изменение параметров в используемой модели в докритической области при переходе к самой критической точке нарушается, а сам переход к пороговой области требует модификации модели.

Отметим, что в [13, 14] при рассмотрении механизма термоактивационного разрушения волокон, наиболее полно учитывающего статистические свойства ансамбля волокон, в рамках аналитического изменения параметров удалось полностью описать процесс разрушения композита с прохождением критической области. В [14] экспериментально было показано, что от термоактивационного процесса может зависеть начало разрушения, однако в самой критической области разрушение композита происходит в виде механического разрушения волокон и определяется их кинетическими свойствами.

В [15, 16] рассмотрено разрушение композиционного материала в условиях действия поперечной к волокнам нагрузки. На основании этих работ в [17, 18] были получены и описаны сигналы АЭ, сопутствующие разрушению при таком виде нагружения композита. При этом в [17] получены выражения для АЭ при разрушении волокон за счет растяжения или изгиба, которые реализуются при поперечной нагрузке волокон. Было показано, что АЭ может быть эффективным методом определения критических напряжений, при которых начинается разрушение, а так же была проанализирована зависимость параметров сигналов от скорости нагружения материала. Однако, приведенные в [17] теоретические сигналы АЭ, полученные на основании модели [15, 16], отличаются (в первую очередь по форме, что является принципиальным) от реальных сигналов, регистрируемых при испытаниях композиционных материалов.

В [18] при описании разрушения композиционного материала исходили из неаналитического поведения параметров материала в критической области. Такое представление отвечает кинетике поведения материалов [19, 20] и соответствующего изменения эквивалентного напряжения при разрушении волокон [15, 16]. Как было получено в эксперименте, описанном в [18], при разрушении композиционного материала в критической области формируется непрерывный сигнал АЭ, который характеризуется ускоренным нарастанием переднего фронта и, что очень важно, имеет затухание заднего фронта релаксационного типа. При этом было показано, что с увеличением скорости нагружения происходит уменьшение

времени протекания процесса разрушения, увеличение амплитуды формируемого сигнала АЭ, уменьшение его длительности, а так же трансформация сигнала в сигнал треугольной формы. Эти особенности могут быть связаны как с нелинейностью деформирования композита, что обсуждается в [15, 16], так и с особенностями самого процесса разрушения и свойствами волокон.

Задачи исследования

В настоящей работе в приближении релаксационной модели будут получены сигналы АЭ при условии, что процесс разрушения волокон имеет пороговый характер с экспоненциально возрастающей скоростью в критической области. Предполагается, что в до пороговой области деформирование образца не линейно.

Модель релаксационного разрушения

Основные положения, используемые при построении модели разрушения композиционного материала, примем такими же, как и в работах [11–13, 15–18]. Будем считать, что образец материала состоит из N_0 одинаковых волокон (элементов) с длиной ℓ и с поперечным размером d . При этом $\ell \gg d$. Волокна разрушаются за счет напряжения растяжения (отметим, что при изгибе волокон также возникают растягивающие напряжения). Волокна равномерно распределены по всему объему образца. Будем считать, что разрушение волокон в образце происходит последовательным образом и наступает тогда, когда деформация и, соответственно, связанное с ней напряжение, достигает порогового уровня. При этом будем полагать, что внешними условиями задается величина деформации композита, которая изменяется во времени равномерно. Будем также считать, что выполнены все условия, обсуждаемой во введении модели пучка волокон, когда влиянием матрицы можно пренебречь.

Как уже отмечалось, деформирование волокон может быть нелинейным. Например, в работах [15, 16] зависимость изменения напряжений на волокнах при их разрушении описывается выражением, которое имеет вид

$$\sigma(\varepsilon) = \varepsilon(1 - \varepsilon)(1 - g\sqrt{\varepsilon}), \quad (1)$$

где σ – напряжение; ε – деформация; g – коэффициент, зависящий от геометрических размеров волокна (ℓ и d).

В общем случае при наличии нелинейности зависимость напряжения от деформации можно записать в виде

$$\sigma(\varepsilon) = E\varepsilon - E\zeta\varepsilon^2 - E\zeta_1\varepsilon^3 \dots, \quad (2)$$

где E – модуль упругости волокна; ζ, ζ_1, \dots – параметры.

Если принять, что модуль упругости равен единице ($E = 1$) и ограничиться только вторым членом разложения в (2), то зависимость напряжения от деформации примет вид

$$\sigma(\varepsilon) = \varepsilon - \zeta \varepsilon^2, \quad (3)$$

где ζ – безразмерный параметр.

Для граничной деформации ε_0 , отвечающей предельному напряжению σ_0 разрушения элементов материала, должно выполняться равенство

$$\varepsilon_0 - \zeta \varepsilon_0^2 = \sigma_0. \quad (4)$$

Выражение (4) можно записать в виде

$$\varepsilon_0 = \frac{1 - \sqrt{1 - 4\zeta\sigma_0}}{2\zeta} \quad (5)$$

Если деформирование материала происходит равномерно, т.е. $\varepsilon = \alpha t$, где $\alpha = \text{const}$ – скорость деформирования, то из (5) можно определить критическое время t_0 , отвечающее началу разрушения элементов композиционного материала

$$t_0 = \frac{1 - \sqrt{1 - 4\zeta\sigma_0}}{2\alpha\zeta}. \quad (6)$$

В приближении релаксационной модели, которая будет использоваться нами, разрушение элементов (волокон) композиционного материала не происходит мгновенно, а момент времени t_0 лишь отвечает началу разрушения. В связи с этим, введем новую переменную $\tau = t - t_0$, где τ отсчитывается от начала разрушения. Тогда, для $t > t_0$ и для $\tau > 0$, напряжение на элементах будет выше критического и будет квадратично зависеть от времени

$$\sigma(t) = \sigma_0 + \sqrt{1 - 4\sigma_0\zeta}\alpha\tau - \zeta\alpha^2\tau^2. \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что в критической области нелинейность изменения напряжения на волокнах связана, как с параметром ζ , так и с параметром α . Очевидно, что при протекании процесса разрушения $\tau \ll t_0$. Поэтому следует ожидать, что в сигналах АЭ не будет проявляться вклад от нелинейности, связанный с последним слагаемым в (7).

Для сравнения на рис. 1 показаны зависимости изменения напряжения во времени в относительных единицах, полученные с использованием (1) и (3), при постоянной скорости нагружения α . При построении графиков рис. 1 учтено, что выражения (1) и (3) записаны в безразмерных величинах. Также проведено обезразмеривание скорости ввода деформации

$$\varepsilon = \tilde{\alpha}\tilde{t},$$

где $\tilde{\alpha} = \frac{\alpha t_0}{\varepsilon_0}$, $\tilde{t} = \varepsilon_0 \frac{t}{t_0}$ – безразмерные величины. При таком обезразмеривании скорости ввода деформации при $\tilde{\alpha} = 1$ критическая деформация $\varepsilon_0 = \tilde{t}_0$. Соответственно увеличение $\tilde{\alpha}$ в десять раз, как на рис. 1, приведет к уменьшению в десять раз времени \tilde{t}_0 .

Графики 1 и 2 на рис. 1 построены при $g = 0,1$, $\zeta = 1,37$. Время начала процесса разрушения равно $\tilde{t}_0 = 0,0005$, критическое напряжение принято равным $\tilde{\sigma}_0 = 0,00497$, т.е. приблизительно равно $\sim E/200$. Скорость ввода деформации $\tilde{\alpha}$. Из рис. 1 видно, что зависимость изменения напряжения во времени, согласно (1), до критического времени хорошо аппроксимируется выражением (3). При этом ζ не равно единице. Таким образом, может оказаться, что параметр ζ может быть не малым по величине, т.е. деформирование образца происходит существенно нелинейно. Однако ход зависимости $\sigma(\varepsilon)$, в пределах малых значений ε , практически линейный. Отклонение за счет нелинейности в $\sigma(\varepsilon)$ для момента времени \tilde{t}_0 (в точке ε_0) на рис. 1 составляет $< 1\%$. Следует также отметить, что аппроксимирующая зависимость (3) расходитсся с модельной зависимостью (1) для больших значений σ_0 , когда критическое напряжение становится сопоставимым с модулем Юнга. Однако такие большие значения критических параметров маловероятны.

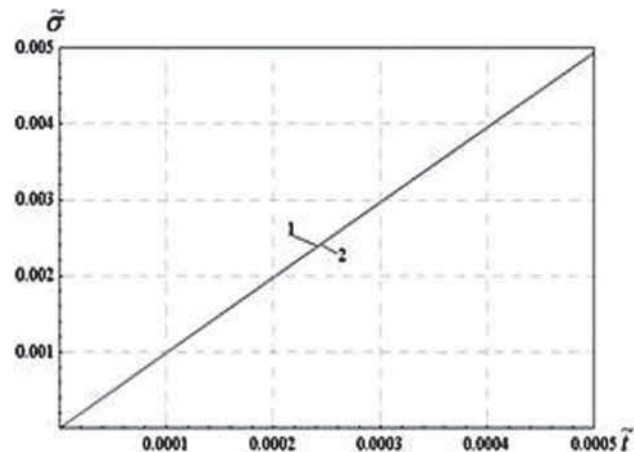


Рис. 1. Зависимости изменения напряжения во времени в относительных единицах до момента времени начала разрушения элементов композиционного материала: 1 – согласно (1); 2 – согласно (3).

Пороговое напряжение $\tilde{\sigma}_0 = 0,00497$, $\alpha = 10$, $g = 0,1$, $\zeta = 1,37$

Из выражения (7) следует, что поведение напряжения $\sigma(\tau)$ в критической области будет практически линейным, так как должно выполняться



условие $\tau \ll t_0$. Однако важно отметить, что коэффициент при τ в (7) зависит, как от скорости деформирования α , так и от параметра ζ , характеризующего не линейность процесса деформирования.

Для описания разрушения волокон, воспользуемся релаксационной моделью, в которой согласно [18] число не разрушенных (целых) волокон определяется уравнением

$$\frac{dN}{dt} = -v(\sigma)N. \quad (8)$$

где $N = N(t) = N_0 - N_p(t)$ – число не разрушенных на данный момент времени волокон; N_0 – исходное количество волокон; $N_p(t)$ – мгновенное значение числа разрушенных волокон; $v(\sigma)$ – скорость протекания процесса разрушения, которая зависит от напряжения $\sigma(t)$.

Выше мы задали, что процесс разрушения волокон имеет пороговый характер. Он начинается с момента времени t_0 и протекает при $t > t_0$. В связи с этим уравнение (8) перепишем в виде:

$$\frac{dN}{d\tau} = -v(\sigma)N. \quad (9)$$

Уравнение (9) по сути, описывает кинетический процесс разрушения волокон, скорость которого зависит от изменения напряжения на волокнах.

Согласно кинетической теории [19, 20], скорость такого процесса возрастает по экспоненциальному закону, начиная с момента времени t_0 , соответствующего пороговому напряжению, т.е.

$$v = v_0 e^{r(\sigma(t) - \sigma(t_0))} = v_0 e^{r(\sqrt{1 - 4\sigma_0\zeta\alpha\tau - \zeta\alpha^2\tau^2})}, \quad (10)$$

где v_0 , r – постоянные, зависящие от физико-механических характеристик материала.

С учетом (10), при условии того, что нагружение композиционного материала происходит с постоянной скоростью, выражение (9) будет иметь вид

$$\frac{dN}{N} = -v_0 e^{r(\sqrt{1 - 4\sigma_0\zeta\alpha\tau - \zeta\alpha^2\tau^2})} d\tau. \quad (11)$$

Проинтегрируем уравнение (11). При этом будем учитывать, что до момента времени $t = t_0$ значение $N_p(t)$ равно нулю, т.е. $N_p(t_0) = 0$. В результате интегрирования получим выражение для числа оставшихся волокон

$$N(t) = N_0 e^{-v_0 \int_0^{\tau} e^{r(\sqrt{1 - 4\sigma_0\zeta\alpha\tau - \zeta\alpha^2\tau^2})} d\tau}. \quad (12)$$

Также запишем выражение для числа не разрушенных волокон, в соответствии с [18], когда напряжения изменяются согласно (1). Оно имеет вид

$$N(\tau) = N_0 e^{-v_0 \int_0^{\tau} e^{r\alpha[(\tau+t_0)(1-\alpha(\tau+t_0))(1-g\sqrt{\alpha(\tau+t_0)}) - t_0(1-\alpha t_0)(1-g\sqrt{\alpha t_0})]} dt}. \quad (13)$$

Проведем численное моделирование временного хода количества не разрушенных элементов при разных значениях параметров ζ и α . Рассмотрим два случая. Для первого случая построим зависимости $N(\tau)$ при разных значениях ζ и одинаковой величине α , во втором случае поступим наоборот.

На рис. 2 приведены графики временного хода зависимости числа неразрушенных элементов, полученные с использованием выражений (12) и (13),

для $\tilde{\sigma}_0 = 0,00497$, $\alpha = 10$, $\tilde{t}_0 = 0,0005$, $\tilde{v}_0 = 100000$, $r = 10000$, $g = 0,1$ при разных значениях ζ , где \tilde{v}_0 нормировано как α . При этом значения ζ принимали равными: $\zeta = 1,37$, $\zeta = 1,39$ и $\zeta = 1,41$. На графиках время τ нормировано как и время t , а число неразрушенных элементов нормировано на начальное число всех волокон $\tilde{N} = \frac{N}{N_0}$.

Из рис. 2 видно, что временные зависимости числа не разрушенных элементов практически не зависят от предпринятого нами изменения величины ζ . При этом все кривые на рис. 2 хорошо совпадают между собой. Дисперсия отклонения зависимостей 2, 3 и 4, показанных на рис. 2, от зависимости 1 (рис. 2) для вероятности 0,9999 не превышает $2,12 \cdot 10^{-6}$.

На рис. 3 при моделировании временной зависимости $N(\tau)$ скорость ввода деформации $\tilde{\alpha}$ изменялась в диапазоне значений от 10 до 50. Пороговое напряжение начала разрушения равно $\tilde{\sigma}_0 = 0,00497$. Время начала разрушения элементов для заданных значений $\tilde{\alpha}$ равно:

$$\begin{aligned} \text{для } \tilde{\alpha} = 10 & - \tilde{t}_0 = 0,0005; \\ \text{для } \tilde{\alpha} = 20 & - \tilde{t}_1 = 0,00025; \\ \text{для } \tilde{\alpha} = 40 & - \tilde{t}_2 = 0,000125; \\ \text{для } \tilde{\alpha} = 50 & - \tilde{t}_3 = 0,0001. \end{aligned}$$

Значение параметра $\zeta = 1,37$. Величины параметров v_0 , r и g приняты равными:

$$\tilde{v}_0 = 100000, r = 10000 \text{ и } g = 0,1.$$

Из рис. 3 видно, что при увеличении $\tilde{\alpha}$ возрастает скорость разрушения элементов. При этом происходит качественное изменение хода зависимости $N(\tau)$. При больших величинах $\tilde{\alpha}$ наблюдается перегиб в зависимости $N(\tau)$.

Следует полагать, что такая модификация зависимости $N(\tau)$ приведет к соответствующим изменениям сигналов АЭ.

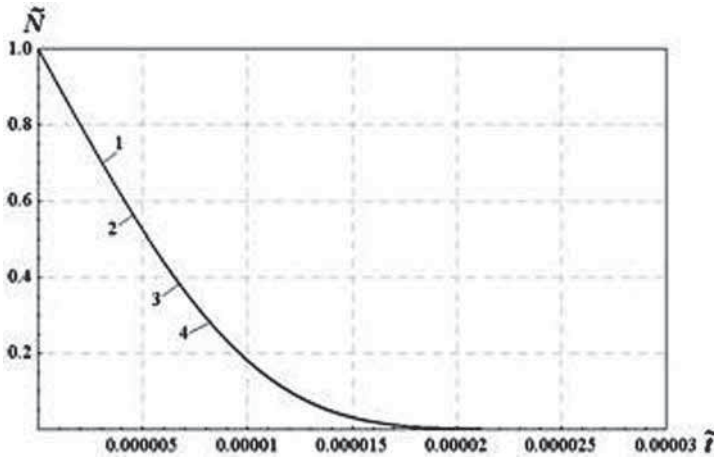


Рис. 2. Зависимости от времени числа неразрушенных элементов при $\tilde{\alpha} = 10$, $\tilde{v}_0 = 100000$, $r = 10000$, $g = 0,1$, $\tilde{t}_0 = 0,0005$.

Кривая 1 получена согласно выражению (13). Кривые 2, 3, 4 получены согласно выражению (12) при соответствующих им значениях ζ :
 2 - $\zeta = 1,37$; 3 - $\zeta = 1,39$; 4 - $\zeta = 1,41$

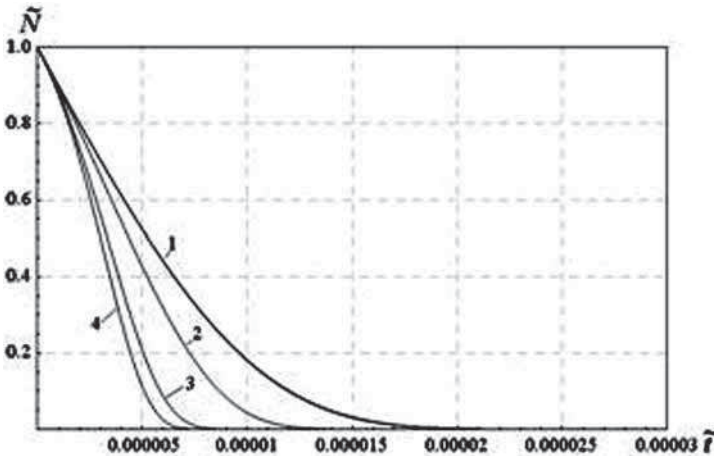


Рис. 3. Зависимости от времени числа не разрушенных элементов, полученные согласно (12), при $\zeta = 1,37$, $\tilde{v}_0 = 100000$, $r = 10000$, $g = 0,1$, $\tilde{\sigma}_0 = 0,00497$. Для кривых 1-4 $\tilde{\alpha}$ принимает значения:
 1 - $\tilde{\alpha} = 10$; 2 - $\tilde{\alpha} = 20$; 3 - $\tilde{\alpha} = 40$; 4 - $\tilde{\alpha} = 50$

Моделирование сигналов АЭ

Рассмотренную релаксационную модель разрушения композиционного материала будем использовать для описания сигнала АЭ, формируемого при разрушении волокон. Условия формирования сигнала АЭ примем такими же, как и в работах [18, 21]. Будем полагать, что разрушение каждого элемента композиционного материала приводит к формированию одиночного импульса возмущения, который распространяется в виде импульса смещения. Амплитудное значение такого импульса A_0 , а его длительность δ мала и намного меньше времени всего процесса разрушения. Затухание смещения рассматривать не будем. При этом будем считать, что амплитуда импульса возмуще-

ния зависит от напряжения разрушения, т.е. $A_0(\tau) = \beta\sigma(t_0 + \tau)$, где β – коэффициент пропорциональности. В общем случае, выражение для временной зависимости импульса возмущения можно записать в виде

$$A_0(\tau, \eta) = A_0(\tau)a(\eta), \quad (14)$$

где $a(\eta)$ – функция, определяющая форму импульса возмущения.

Результирующее смещение, формируемое при разрушении элементов композиционного материала, будет определяться числом импульсов, произведенных за единицу времени, т.е. $D(t) = D(\tau) = \left| \frac{dN(\tau)}{d\tau} \right|$.

Тогда, результирующее смещение будет иметь вид

$$U(\tau) = D(\tau)A_0(t_0 + \tau) \int_{-\frac{\delta}{2}}^{\frac{\delta}{2}} a(\eta)d\eta. \quad (15)$$

Выражение (15) выполняется при условии, что длительность одиночного импульса возмущения δ намного меньше времени развития процесса разрушения, когда величины $D(\tau)$ и $A_0(t_0 + \tau)$ на интервале времени $[\tau - \delta/2, \tau + \delta/2]$ можно считать постоянными.

С учетом (8), (12) и (14) выражение (15) примет вид

$$U(t) = u_0 v_0 [\sigma_0 + \sqrt{1 - 4\sigma_0 \zeta \alpha \tau - \zeta \alpha^2 \tau^2}] \times e^{r[\sqrt{1 - 4\sigma_0 \zeta \alpha \tau - \zeta \alpha^2 \tau^2}]} \times e^{-v_0 \int_0^\tau r[\sqrt{1 - 4\sigma_0 \zeta \alpha \tau - \zeta \alpha^2 \tau^2}] d\tau}, \quad (16)$$

где $u_0 = N_0 \beta \delta$, а δ_s – средняя длительность одиночного импульса смещения, равна интегралу в правой части (15).

При использовании широкополосного приемного преобразователя АЭ электрический сигнал на его выходе будет полностью повторять импульс смещения, описываемый выражением (16). Другими словами, выражение (16) должно соответствовать сигналу АЭ на выходе приемного преобразователя.

На рис. 4 (кривые 1, 2, 3) приведены графики нормированных зависимостей $\tilde{U}(t) = U(t)/u_0$ для сигналов АЭ с величинами параметров, такими же, как и на рис. 2. Приведенные графики пока-



зывают, что при одинаковом значении α и разных величинах ζ в параметрах сигналов АЭ не наблюдается изменений. Длительность и амплитуда сигналов АЭ остаются постоянными величинами. Развитие сигнала АЭ для этих параметров мо-ели имеет скачкообразный пороговый характер, а сам сигнал относится к релаксационному типу, что хорошо соответствует используемой модели релаксационного разрушения композиционного материала.

Величина амплитуды импульса зависит от порогового напряжения $\tilde{\sigma}_0$. Другими словами, чем больше величина начального (порогового) напряжения разрушения $\tilde{\sigma}_0$, тем больше амплитуда формируемого импульса возмущения, и, как следствие, амплитуда сигнала АЭ. При уменьшении $\tilde{\sigma}_0$ будет происходить уменьшение амплитуды сигнала АЭ, что и наблюдается в результатах моделирования, приведенных на рис. 4, кривые 4, 5, 6. Сигналы АЭ на рис. 4 (кривые 4, 5, 6) построены при тех же самых значениях параметров, что и на рис. 4 (кривые 1, 2, 3), а $\tilde{\sigma}_0$ уменьшено в 2,5 раза. При этом время начала разрушения равно $\tilde{t}_0 = 0,0002$.

Полученные результаты показывают, что для параметров модели, используемых при построении графиков на рис. 4, для заданной скорости нагружения форма сигналов АЭ не зависит от величины параметра нелинейности деформирования, а так же не зависит от величины порогового напряжения. При этом сигнал АЭ по своей форме является сигналом релаксационного типа.

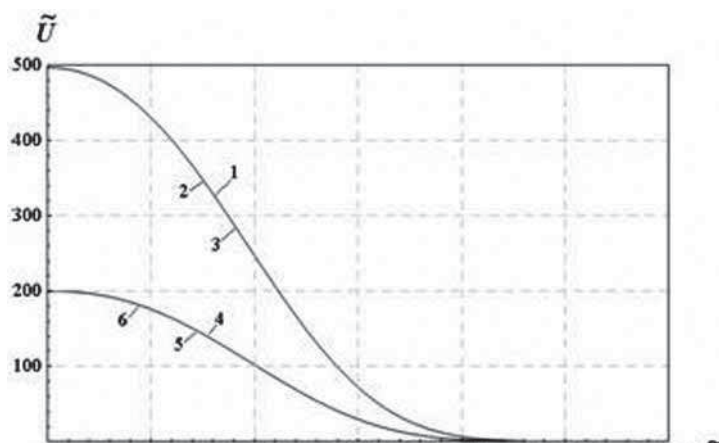


Рис. 4. Временной ход $\tilde{U}(\tilde{t})$ для сигналов АЭ, полученных с использованием (16) при $\tilde{\alpha} = 10$, $\tilde{\nu}_0 = 100000$, $r = 10000$, $g = 0,1$.
Значение параметра \tilde{t}_0 : 1, 2, 3 – $\tilde{t}_0 = 0,0005$; 4, 5, 6 – $\tilde{t}_0 = 0,0002$.
Значения параметра ζ : 1, 4 – $\zeta = 1,37$; 2, 5 – $\zeta = 1,39$; 3, 6 – $\zeta = 1,41$

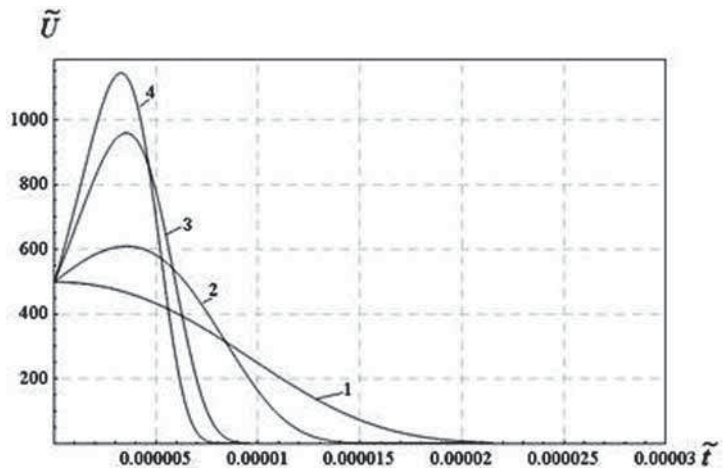


Рис. 5. Временной ход $\tilde{U}(\tilde{t})$ для сигналов АЭ, полученных с использованием (16) при $\zeta = 1,37$, $\tilde{\nu}_0 = 100000$, $r = 10000$, $g = 0,1$, $\tilde{\sigma}_0 = 0,00497$.

Значения параметра $\tilde{\alpha}$:

1 – $\tilde{\alpha} = 10$; 2 – $\tilde{\alpha} = 20$; 3 – $\tilde{\alpha} = 40$; 4 – $\tilde{\alpha} = 50$

На рис. 5 приведены графики временной зависимости $\tilde{U}(\tilde{t})$ сигналов АЭ, полученных при разных скоростях ввода нагрузки. Как и ожидалось из графиков, приведенных на рис. 3, сигналы АЭ изменяют свою форму, отражая появление перегиба на кривых $N(\tau)$. До точки перегиба в зависимости $\tilde{U}(\tilde{t})$ происходит ускоренное разрушение числа элементов композиционного материала. Это приводит к тому, что на этом участке возрастает амплитуда сигнала АЭ. При этом максимум амплитуды сигнала смещается к точке перегиба в зависимости $\tilde{U}(\tilde{t})$.

Как и в случае сигналов, приведенных на рис. 4, начальный скачок амплитуды $\tilde{U}(\tau = 0)$ определяется величиной порогового напряжения и не зависит от скорости деформирования. При возрастании α наблюдается сжатие сигналов АЭ во времени и возрастание их амплитуды.

Выводы

В работе с использованием релаксационной модели разрушения композиционного материала получено, что при пороговом изменении скорости разрушения элементов, нелинейность деформирования композита практически не оказывает влияния на форму и амплитуду формируемого сигнала.

Показано, что в релаксационной модели главное влияние на характеристики и форму сигналов АЭ оказывают физико-механические параметры волокон, а так же скорость деформирования композиционного материала, задаваемая внешними усло-

виями. При малых скоростях деформирования сигнал АЭ имеет релаксационный вид с амплитудным значением, отвечающим началу процесса разрушения. В рамках проделанного моделирования сигнал АЭ релаксационного типа не изменяет своей формы при изменении параметров модели, а так же не изменяет своего вида при уменьшении порогового напряжения разрушения.

В тоже время, форма сигнала АЭ изменяется при возрастании скорости деформирования. Действительно, при увеличении скорости деформирования на начальном этапе становится возможным возрастание величины сигнала АЭ. При этом происходит возрастание крутизны, как переднего, так и заднего фронта сигнала. Для такого режима разрушения амплитуда сигнала АЭ и его длительность зависят от скорости деформирования. В то же время, процесс разрушения композиционного материала и, безусловно, формируемые сигнала АЭ будут зависеть от физико-механических характеристик материала. Поэтому необходимо проведение исследования закономерностей изменения процесса разрушения и параметров сигналов АЭ при изменении физико-механических характеристик материала.

Литература

1. *Coleman B.D.* Time dependence of mechanical breakdown phenomena / B.D. Coleman // J. Ap. Phys. – 1956. – V. 27. – № 8. – P. 862–866.
2. *Coleman B.D.* Statistics and time dependence of mechanical break-down in fibers / B.D. Coleman // J. Ap. Phys. – 1958. – V. 29. – P. 968–983.
3. *Kun F.* Damage in fiber bundle models / F. Kun, S. Zapperi, H. J. Herrmann // Eur. Phys. J. B. – 2000. – V. 17. – № 2. – P. 269–279.
4. *Moreno Y.* Self-organized criticality in a fibre bundle-type model / Y. Moreno, J. B. Gomez, A. F. Pacheco // Physics A. – 1999. – V. 274. – P. 400–409.
5. *Kun F.* Damage development under gradual loading of composites / F. Kun, H. J. Herrmann // Journal of Materials Science. – 2000. – V. 35. – № 18. – P. 4685–4693.
6. *Curtin W.A.* Theory of mechanical properties of ceramic-matrix composites // J. Am. Ceram. Soc. – 1991. – V. 75. – P. 2837–2845.
7. *Newman W.I.* Time dependent fiber-bundles with local load sharing / W.I. Newman, S.L. Phoenix // Phys. Rev. E. – 2001. – V. 63. – № 2. – P. 20.
8. *Lyakhovskiy V.* Distributed damage, faulting and friction / V. Lyakhovskiy, Y. Ben-Zion, A. Agnon // J. Geophys. – 1997. – V. 102. – No 27. – P. 635–649.
9. *Lyakhovskiy V., Podladchikov Y., Polikov A.* A rheological model of a fractured solid / V. Lyakhovskiy, Y. Podladchikov, A. Polikov // Tectonophysics. – 1993. – V. 226 – P. 187–198.
10. *Hemmer P.C.* The Distribution of Simultaneous Fiber Failures in Fiber Bundles / P.C. Hemmer, A. Hansen // J. Appl. Mech. – 1992. – V. 59. – № 4. – P. 909–914.
11. *Turcotte D.L.* Micro and macroscopic models of rock fracture / D.L. Turcotte, W.I. Newman, R. Shcherbakov // Geophys. J. Intern. – 2003. – V. 152. – No 3. – P. 718–728.
12. *Shcherbakov R.* On modeling of geophysical problems: A dissertation for degree of doctor of philosophy / Robert Shcherbakov. – Cornell university. – 2002. – 209 p.
13. *Филоненко С.Ф.* Модель формирования сигнала акустической эмиссии при разрушении композиционного материала / С.Ф. Филоненко, В.М. Калита, Т.В. Нимченко // Технологические системы. – 2009. – № 2(46). – С. 17–25.
14. *Филоненко С.Ф.* Закономерности изменения параметров акустической эмиссии при разрушении хрупких композиционных материалов / С.Ф. Филоненко, В.М. Калита, Т.В. Нимченко // Технологические системы. – 2009. – № 3(47). – С. 27–33.
15. *Raischel F.* Simple beam model for the shear failure of interfaces / F. Raischel, F. Kun, H. J. Herrmann // Phys. Rev. E – 2005. – V. 72. – № 4. – P. 11.
16. *Raischel F.* Local load sharing fiber bundles with a lower cutoff of strength disorder / F. Raischel, F. Kun, H. J. Herrmann // Phys. Rev. E. – 2006. – V. 74(2). – № 3. – P. 4.
17. *Филоненко С.Ф.* Акустична емісія при руйнуванні композиційних матеріалів / С.Ф. Филоненко, В.М. Калита, О.П. Космач // Вісник НАУ. – 2010. – № 1. – С. 133–141.
18. *Филоненко С.Ф.* Модель сигнала акустической эмиссии при разрушении композиционного материала под действием поперечной силы / С.Ф. Филоненко, В.М. Калита, Т.Н. Косицкая, А.П. Космач // Технологические системы. – 2010. – № 2. – С. 23–35.
19. *Регель В.Р.* Кинетическая природа прочности твердых тел / Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
20. *Маламедов И.М.* Физические основы надежности. - Л.: Энергия, 1970. – 152 с.
21. *Babak V.P.* Model of acoustic emission signal at self-accelerated crack development / V.P. Babak, S.F. Filonenko, V.M. Kalita // Aviation. – V. IX. – № 2, 2005. – P. 3–8.