

УДК 620.179:534.6

Филоненко С.Ф.<sup>1</sup>, Калита В.М.<sup>2</sup>, Космач А.П.<sup>1</sup>, Косицкая Т.Н.<sup>1</sup><sup>1</sup> Национальный авиационный университет. Украина, г. Киев<sup>2</sup> Национальный технический университет Украины «КПИ». Украина, г. Киев

## МОДЕЛЬ СИГНАЛА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОПЕРЕЧНОЙ СИЛЫ

### Анотація

*Розроблено модель сигналу акустичної емісії, який формується при руйнуванні композиційного матеріалу під дією поперечної сили. Розглянуто закономірності процесу руйнування композиційного матеріалу, а також параметрів формованих сигналів акустичної емісії і трансформації їх форми в залежності від швидкості деформування.*

### Abstract

*The model of acoustic emission signal, which one is reshaped at destruction of a composite material under operating of shear load is designed. The regularity destruction process of composite material, parameters of reshaped acoustic emission signals and transformation of their form from velocity deforming function is reviewed.*

### Постановка проблемы

Композиционные материалы обладают высокими физико-механическими характеристиками и имеют широкое распространение в различных областях техники. Они используются не только в изделиях или отдельных их узлах, например, изделиях авиационной, автомобильной или строительной промышленности, но и в технологических процессах изготовления самих изделий, например, процессах обработки материалов резанием, трением и другими методами. Несмотря на значительные преимущества композиционных материалов, они подвержены хрупкому разрушению. Процесс разрушения композиционного материала, как и в любого материала, происходит с постепенным накоплением повреждений на всех уровнях, т. е. сопровождается ростом субмикро-, микро- и макротрещин. Их развитие, в конечном итоге, ведет к потере несущей способности изделий. Однако в композиционных материалах рост трещин может происходить с высокой скоростью, что требует контроля состояния и оценок опасности развивающихся процессов для своевременного предупреждения разрушения изделий.

Исследования процессов разрушения композиционных материалов осуществляются с использо-

ванием различных методов, одним из которых является метод акустической эмиссии (АЭ). АЭ является отражением не только локальных процессов, происходящих в материалах на всех масштабных уровнях, но и кинетики их протекания. Это обеспечивает широкие возможности применения метода в диагностике материалов и изделий. Однако практическое использование АЭ, как правило, основано на экспериментальных закономерностях, получаемых при наличии достаточно большого числа факторов. Обобщение таких закономерностей должно основываться на теоретических исследованиях, количество которых, в настоящее время, ограничено. Это обусловлено сложностью явления АЭ, связанного со сложностью не только процессов разрушения материалов, но и факторов, влияющих на данные процессы. Очевидно, что разработка моделей и моделирование сигналов АЭ, является важным направлением получения закономерностей акусто-эмиссионного излучения, информативности параметров сигналов АЭ и, в конечном итоге, методов технической диагностики изделий. Такие исследования должны проводиться с учетом специфики структуры материалов, существующих концепций и закономерностей кинетики их разрушения. В полной мере, это относится к композиционным материалам.

### Анализ последних исследований и публикаций

Вопросам разрушения композиционных материалов в научной литературе уделялось и уделяется большое внимание [1–8], что, как отмечено выше, обусловлено широким их применением при изготовлении различных деталей и конструкций. В первую очередь, это относится к ответственным деталям, которые испытывают значительные нагрузки. В качестве концепции для проведения исследований процесса разрушения композиционных материалов используется концепция, согласно которой композиционный материал представляется в виде пучка волокон (fiber bundle model) [3, 4, 7, 8].

При приложении к материалу внешней нагрузки его разрушение рассматривается как процесс последовательного разрушения волокон. При этом предполагается, что потеря несущей

способности композиционного материала обусловлена разрушением волокон, которые выдерживают основную нагрузку. Такое допущение имеет силу, когда матрица является эластичной или имеет меньшую прочность, чем связка (волокно), и ее разрушение не ведет к разрушению материала, так как нагрузку выдерживают волокна. Если матрица обладает большей прочностью, чем волокно, то при упругом деформировании разрушение начинается с разрушения волокон. Постепенное накопление таких разрушений и приводит к разрушению материала. Исходя из этого, влияние свойств матрицы и поверхности раздела матрица-волокно на процесс разрушения материала не рассматривается (не учитывается).

Модели процесса разрушения материала анализируются с позиций равномерного перераспределения напряжений либо в локальной области разрушения волокон, либо на все не разрушившиеся волокна. Однако большинство теоретических и экспериментальных исследований посвящено разрушению композиционного материала в условиях одноосного растяжения с анализом формируемого акустического излучения [9–13]. Теоретические исследования, включая и исследования сигналов АЭ, основываются на том, что материал состоит из волокон, которые до разрушения деформируются упруго, а скорость их разрушения описывается степенным эмпирическим выражением. При этом считается, что упругая энергия, запасенная в одиночном волокне, высвобождается в виде энергии АЭ-события с некоторым коэффициентом пропорциональности, являющимся константой. При таких условиях получены соотношения для скорости изменения оставшихся волокон и скорости высвобождения энергии событий АЭ. Однако полученные соотношения характеризуют процессы разрушения и акустического излучения только в приближении к полному разрушению материала, так как в данный момент времени возникает разрыв исследованных функций. Наличие такой неоднозначности не позволило получить математическое выражение для сигнала АЭ, который формируется при разрушении композиционного материала.

Аналитическое выражение для сигнала АЭ при разрушении композиционного материала получено в работе [14]. В основу построения модели положена модель разрушения пучка волокон с допущениями, которые использованы в работах [9, 10]. Однако процесс разрушения композиционного материала рассматривается как кинетический терактивационный процесс. Результаты проведенных исследований [14, 15] показали, что в сигналах АЭ отсутствуют скачки или критическое время развития процесса разрушения с особеннос-

тями в производных, которые характерны для моделей разрушения, рассмотренных в [9, 10]. При этом так же показано [14, 15], что зависимости изменения во времени числа не разрушившихся волокон имеют непрерывный спадающий характер. Их крутизна (скорость разрушения) определяется величиной напряжения, приложенного к материалу. Сигнал АЭ характеризуется акселерационным нарастанием переднего фронта и максимум амплитуды в момент времени наиболее быстрого развития процесса разрушения. Так же определено, что увеличение приложенного напряжения приводит к возрастанию амплитуды сигнала АЭ и уменьшению его длительности. В тоже время, при возрастании скорости приложения напряжения наблюдается трансформация формы сигнала АЭ с исчезновением акселерационного характера роста его амплитуды.

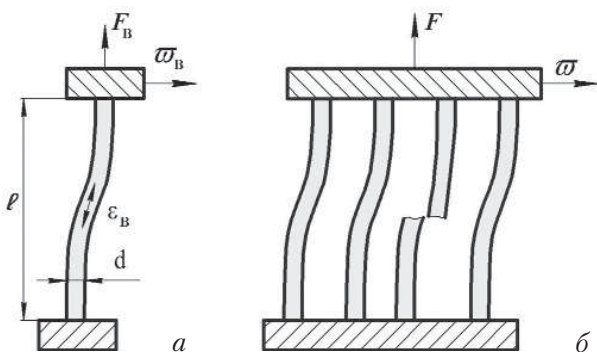
Исследования процесса разрушения композиционного материала при приложении сдвиговой нагрузки рассмотрены в работах [16, 17]. Разработанная модель разрушения основана на предположении того, что волокна могут разрушаться при достижении критических деформаций (напряжений) изгиба, растяжения или совместно изгиба и растяжения. При этом рассмотрены различные случаи, связанные с видом распределения пороговых значений напряжений (деформаций). В соответствии с данной моделью, в работе [18] рассмотрена модель сигнала АЭ, формируемого при разрушении композиционного материала в условиях сдвиговой нагрузки. При этом рассмотрен простейший случай описания процесса разрушения при достижении критических нагрузок. Это позволило качественно оценить, каким образом изменяются упругие свойства образца в зависимости от приложенной нагрузки. Проведенные исследования показали, что сигналы АЭ имеют простейшие формы и возникают в точке начала разрушения материала, не зависимо от вида разрушения волокон (растяжением, изгибом или совместно обоими способами). Это позволяет использовать сигналы АЭ для контроля достижения предельно допустимых нагрузок, начиная с которых происходит необратимое разрушение композиционного материала. Однако реальные сигналы АЭ, регистрируемые при испытаниях композиционных материалов, имеют сложные формы. Это обусловлено не только более сложным характером перераспределения напряжений (эквивалентных напряжений) при разрушении волокон композиционного материала, но и кинетикой процесса разрушения. Учет подобных закономерностей разрушения композиционного материала может быть положен в основу модели сигнала АЭ, формируемого в процессе разрушения материала под действием сдвиговой нагрузки.

**Задачи исследования**

В работе, с учетом закономерностей изменения эквивалентных напряжений и кинетики процесса разрушения, будет рассмотрены модель изменения числа оставшихся волокон при приложении к композиционному материалу поперечной силы, а так же модель формируемого сигнала АЭ. Будут определены закономерности изменения числа оставшихся волокон, а так же закономерности изменения параметров формируемых сигналов АЭ и трансформации их формы.

**Результаты исследований**

Как и в работах [16–18], будем считать, что образец материала состоит из  $N_0$  волокон (элементов) одинакового размера, которые равномерно распределены по его объему. Как было отмечено выше, считаем, что матрица не влияет на процесс потери несущей способности материала. Положим, что при приложении к волокнам поперечной силы  $\varpi$  они деформируются упруго, а расстояние  $\ell$  между плоскостями закрепления волокон не изменяется (рис. 1). При таком нагружении на волокнах возникает изгибающий момент  $m$  и растягивающее усилие  $F$ . Будем считать, что разрушение волокон в образце происходит последовательным образом, а внешняя приложенная нагрузка перераспределяется равномерно на оставшиеся волокна, которые испытывают одинаковую возрастающую осевую деформацию. Будем полагать, что разрушение волокон наступает тогда, когда их деформация достигает некоторого порогового уровня, т. е. разрушение происходит за счет изгиба или растяжения. Они могут быть независимы или связаны между собой некоторым выражением.



**Рис. 1.** Схема нагружения единичного волокна (а) и группы волокон (б):

$\ell$  – длина волокон;  $d$  – толщина волокна;  $\varpi$  – поперечная сила (нагрузка);  $F$  – растягивающее усилие;  $\varpi_B, F_B, \epsilon_B$  – соответственно, поперечная сила, растягивающая сила и осевая деформация на волокне

Изгиб и растяжение, возникающие в результате приложения поперечной силы, в работах [16, 17] рассмотрены как функции осевой деформации.

Считая, что при нагружении образца в области упругости деформация и напряжение на всех волокнах одинаковы, а распределения пороговых уровней деформации изгиба и растяжения независимы, авторами указанных работ получено выражение для изменения общего напряжения на волокнах в процессе их разрушения в виде

$$\sigma = \epsilon \int_{q(\epsilon)}^{\epsilon_{2\max}} d\epsilon_2 p_2(\epsilon_2) \int_{f(\epsilon)}^{\epsilon_{1\max}} d\epsilon_1 p_1(\epsilon_1) = [1 - P_2(q(\epsilon))] [1 - P_1(f(\epsilon))], \tag{1}$$

где  $\epsilon$  – деформация;  $p_1(\epsilon), p_2(\epsilon)$  – соответственно, плотности вероятностей пороговых уровней при растяжении и изгибе;  $P_2(q(p_1(\epsilon))), P_1(f(p_1(\epsilon)))$  – функции распределения;  $f(\epsilon)$  и  $q(\epsilon)$  – функции отказа волокна;  $f(\epsilon) = \epsilon, q(\epsilon) = \vartheta\sqrt{\epsilon}$  при модуле упругости  $E = 1$ ;  $\vartheta$  – коэффициент пропорциональности.

Выражение (1) предполагает наличие двух независимых способов разрушения, так называемый случай “or rule” (“правило или”). Согласно этому правилу, разрушение волокна происходит тогда, когда его деформация растяжения или деформация изгиба достигает определенного уровня  $\epsilon_1$  или  $\epsilon_2$ , т. е. выполняются условия разрушения вида

$$\frac{f(\epsilon)}{\epsilon_1} \geq 1 \tag{2}$$

или

$$\frac{q(\epsilon)}{\epsilon_2} \geq 1. \tag{3}$$

Из (1) так же следует, что наличие двух способов приводит к тому, что разрушение волокон происходит при напряжениях меньше прочности материала на растяжение, т. е. критическое напряжение разрушения имеет меньшее значение, чем при разрушении волокон растяжением.

Для случая независимых равномерных распределений пороговых уровней  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  в диапазонах величин  $[\epsilon_{1\min}, \epsilon_{1\max}]$  и  $[\epsilon_{2\min}, \epsilon_{2\max}]$ , выражение (1) будет иметь вид

$$\sigma = \epsilon \frac{[\epsilon_{1\max} - f(\epsilon)][\epsilon_{2\max} - q(\epsilon)]}{[\epsilon_{1\max} - \epsilon_{1\min}][\epsilon_{2\max} - \epsilon_{2\min}]}. \tag{4}$$

Более специфическим является случай независимых равномерных распределений пороговых уровней с границами  $[0,1]$ . Тогда, с учетом функций отказов  $f(\epsilon)$  и  $q(\epsilon)$ , выражение (4), согласно [16, 17], примет вид

$$\sigma(\epsilon) = \epsilon(1 - \epsilon)(1 - g\sqrt{\epsilon}), \tag{5}$$

где  $g$  – коэффициент, зависящий от геометрических

размеров волокна (площади поперечного сечения и длины).

Выражение (5) описывает зависимость изменения эквивалентных напряжений на волокнах при развитии процесса разрушения, условием существования которого, является монотонность деформации  $\varepsilon$  во времени.

Положим, что деформация  $\varepsilon$  во времени изменяется по линейному закону, т.е.  $\varepsilon = \alpha t$ , где  $\alpha$  — скорость деформирования. Тогда выражение (5) запишем в виде

$$\sigma(t) = \alpha t(1 - \alpha t)(1 - g\sqrt{\alpha t}). \quad (6)$$

Зависимости изменения напряжения во времени, согласно (6), в относительных единицах для различных значений  $\alpha$ , показаны на рис. 2. При построении графиков (рис. 2) время нормировано на время деформирования (ввода напряжения), которое имеет постоянное значение ( $t_{\max}$ ). Параметр  $\alpha$  приведен к безразмерной величине. Коэффициент  $g$ , согласно [16, 17], определяется соотношением площади поперечного сечения волокна к его длине. Его величина меньше единицы, т. е.  $g < 1$ . При построении графиков (рис. 2)

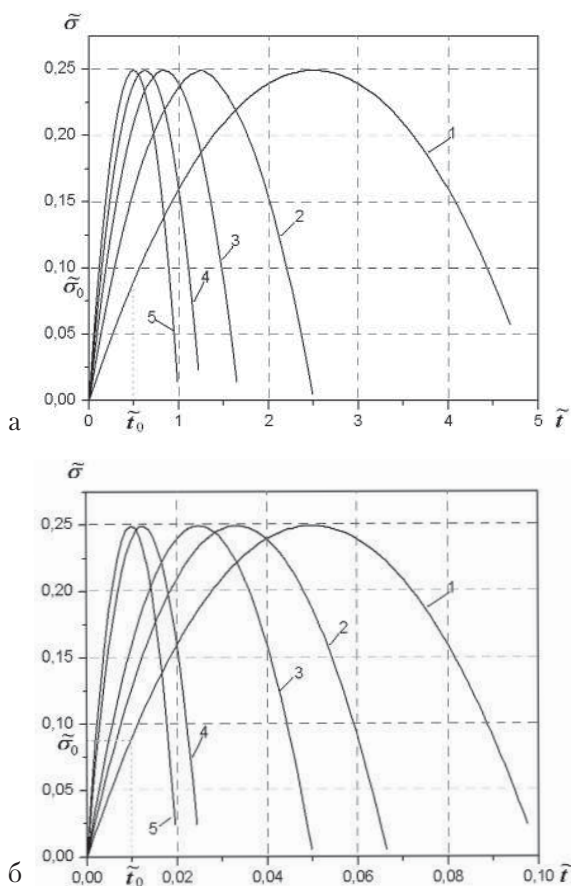


Рис. 2. Зависимость изменения напряжения во времени, согласно (6), для различных скоростей  $\alpha$  линейного изменения деформации:

а: 1 —  $\alpha = 0,2$ ; 2 —  $\alpha = 0,4$ ; 3 —  $\alpha = 0,6$ ; 4 —  $\alpha = 0,8$ ; 5 —  $\alpha = 1,0$ ;  
 б: 1 —  $\alpha = 10$ ; 2 —  $\alpha = 15$ ; 3 —  $\alpha = 20$ ; 4 —  $\alpha = 40$ ; 5 —  $\alpha = 50$

значение  $g$  принято равным  $g = 0,01$ . Увеличение  $\alpha$  означает увеличение скорости деформирования. Для графика на рис. 2, а значения  $\alpha$  изменяется в диапазоне от  $\alpha = 0,2$  до  $\alpha = 1$ , а для рис. 2, б — от  $\alpha = 10$  до  $\alpha = 50$ .

Из рис. 2, а видно, что при увеличении  $\alpha$  наблюдается сжатие диаграммы изменения напряжения во времени. Естественно, что при этом максимальная величина напряжения остается постоянной величиной. Дальнейшее увеличение  $\alpha$  не приводит к изменению характера диаграмм. Наблюдается сжатие диаграммы во времени и постоянство величины максимального напряжения (рис. 2, б). При этом, в зависимости от  $\alpha$ , достижение значения одного и того же уровня напряжения будет происходить за различные промежутки времени. В первую очередь, это относится к заданной величине напряжения  $\sigma_0$ , соответствующего моменту времени начала разрушения композиционного материала.

Переход к осевой деформации позволяет использовать общее выражение для скорости изменения числа оставшихся волокон во времени при протекании процесса разрушения, которое рассмотрено в работах [9, 10]

$$\frac{d}{dt}[N_0 - N_p(t)] = -v(\sigma)[N_0 - N_p(t)], \quad (7)$$

где  $N_0$  — исходное количество волокон;  $N_p(t)$  — количество разрушившихся волокон;  $[N_0 - N_p(t)]$  — число оставшихся элементов;  $v(\sigma)$  — скорость протекания процесса разрушения, которая зависит от напряжения  $\sigma(t)$ .

Если ввести обозначение  $N = N_0 - N_p(t)$ , то выражение (7) перепишем в виде

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

По сути, выражение (8) описывает кинетический процесс разрушения волокон, скорость которого зависит от изменения напряжения на волокнах. При таком развитии процесса разрушения, согласно кинетической теории [19], его скорость возрастает по экспоненциальному закону, начиная с некоторого момента времени  $t_0$

$$v = v_0 e^{r[\sigma(t) - \sigma(t_0)]}, \quad (9)$$

где  $v_0, r$  — постоянные, зависящие от физико-механических характеристик материала;

$\sigma(t)$  — изменение напряжения во времени;

$\sigma(t_0)$  — пороговое напряжение или напряжение, соответствующее моменту начала разрушения.

Экспоненциальная связь (9) между скоростью и напряжением определяет лавинообразный характер протекания процесса разрушения.



С учетом (9), выражение (8) перепишем в виде

$$\frac{dN}{N} = -v_0 e^{r[\sigma(t) - \sigma(t_0)]} dt. \quad (10)$$

Считая, что при нагружении материала деформация изменяется по линейному закону  $\varepsilon = \alpha t$ , то с учетом (6), выражение (10) примет вид

$$\frac{dN}{N} = -v_0 e^{r[\alpha t(1-\alpha t)(1-g\sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0(1-\alpha t_0)(1-g\sqrt{\alpha t_0})]} dt. \quad (11)$$

Проведя интегрирование (11), с учетом того, что до момента времени  $t = t_0$  значение  $N_p(t)$  равно нулю, т. е.  $N_p(t_0) = 0$ , получим выражение для числа оставшихся волокон во времени при развитии процесса их разрушения

$$N(t) = N_0 e^{-v_0 \int_{t_0}^t e^{r[\alpha t(1-\alpha t)(1-g\sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0(1-\alpha t_0)(1-g\sqrt{\alpha t_0})]} dt}. \quad (12)$$

Решение уравнения (12) в символьной форме не представляется возможным. Поэтому анализ закономерностей изменения количества остающихся элементов во времени при развитии процесса разрушения проведем с использованием численного решения. Такое решение выполним при условии того, что для заданной начальной скорости деформирования  $\alpha$  разрушение волокон начинается по достижении некоторого порогового уровня напряжения  $\sigma_0$  в момент времени  $t_0$ . При этом с возрастанием  $\alpha$  величина порогового напряжения начала разрушения  $\sigma_0$  будет оставаться неизменной, что будет соответствовать изменению только значения момента времени начала разрушения  $t_0$ .

Моделирование числа оставшихся волокон проведем в относительных единицах при условии без размерности параметров, входящих в выражение (12). При этом будем считать, что  $\alpha$  изменяется в пределах от  $\alpha = 10$  до  $\alpha = 50$ . Увеличение  $\alpha$  соответствует увеличению скорости деформирования. Пороговое напряжение разрушения (в относительных единицах) для всех величин  $\alpha$  равно  $\tilde{\sigma}_0 = 0,08715395010584848$ . Значения времени начала разрушения для скоростей деформирования  $\alpha = 10$ ,  $\alpha = 20$ ,  $\alpha = 40$  и  $\alpha = 50$  определим из данных, приведенных на рис. (3, а). Эти времена (в относительных единицах), соответственно, составляют:

$$\tilde{t}_0 = 0,01; \tilde{t}_{01} = 0,005; \tilde{t}_{02} = 0,0025; \tilde{t}_{03} = 0,002.$$

Значение параметра  $g$  в выражении (12), характеризующего геометрические размеры волокна, меньше единицы. Поэтому примем  $g = 0,1$ . Значения величин  $v_0$  и  $r$ , входящие в выражение (12) и характеризующие прочностные свойства

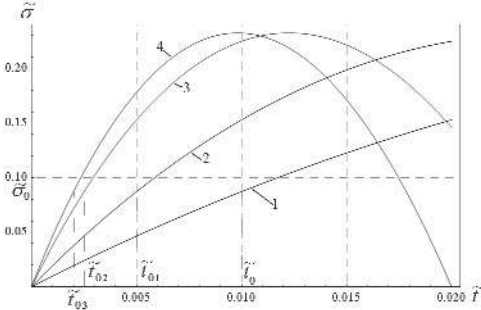
материала, выбирали исходя из следующего. Параметр  $r$  связан с чувствительностью материала к напряжению (характеризует дефектность материала, его дисперсность по прочностным свойствам). Для мало дефектного (мало дисперсного) материала  $r \gg 1$ . Параметр  $v_0$  характеризует прочность связей решетки твердого тела и по порядку величины соответствует  $1/\tau_0$ , где  $\tau_0$  — период собственных колебаний атомов решетки твердого тела, т. е.  $\tau_0 \gg 1$ . При моделировании было принято:  $\tau_0 = 100000$  и  $r = 10000$ .

Результаты моделирования количества оставшихся элементов в виде зависимости  $\tilde{N}(t) = N(t)/N_0$  в относительных единицах для принятых условий, согласно (12), показаны на рис. 3, б. Из рис. 3, б видно, что кривые изменения оставшихся элементов во времени имеют крутой характер падения, т. е. разрушение элементов происходит с высокой скоростью. Смещение времени начала разрушения  $\tilde{t}_0$  в сторону меньших значений, согласно принятым условиям, соответствует увеличению  $\alpha$ . При этом обработка полученных данных показывает, что отношение времени протекания процесса разрушения  $\tilde{\tau}_0$  ко времени начала разрушения  $\tilde{t}_0$  по порядку величины составляет  $\sim 10^{-3}$ .

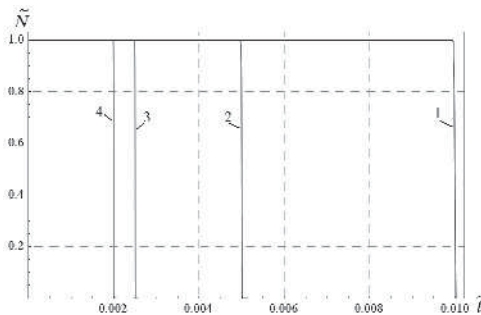
Процесс разрушения композиционного материала, безусловно, будет сопровождаться формированием сигнала АЭ. Основные условия формирования сигнала АЭ примем такими же, как и в работе [14]. Будем считать, что разрушение каждого элемента композиционного материала приводит к формированию одиночного импульса возмущения. Положим, что одиночный импульс возмущения, который распространяется по материалу в виде импульса смещения, имеет вид, показанный на рис. 4, где  $A_0$  — амплитудное значение одиночного импульса возмущения;  $\delta$  — длительность импульса возмущения.

Будем считать, что длительность импульса возмущения  $\delta$  мала и намного меньше времени процесса разрушения образца. Релаксационные процессы при распространении импульса смещения учитывать не будем, т. е. будем считать, что импульс смещения распространяется без затухания. При таких условиях результирующий сигнал смещения, формируемый при разрушении элементов, будет определяться числом импульсов, произведенных в единицу времени. Тогда, с учетом (8) и (12), для скорости разрушения элементов  $D(t)$  можно записать в виде выражения (13):

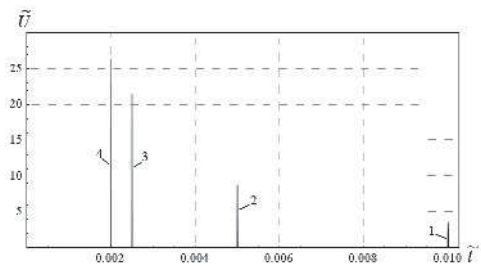
$$D(t) = \left| \frac{dN(t)}{dt} \right| = N_0 v_0 e^{r[\alpha t(1-\alpha t)(1-g\sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0(1-\alpha t_0)(1-g\sqrt{\alpha t_0})]} \times e^{-v_0 \int_{t_0}^t e^{r[\alpha t(1-\alpha t)(1-g\sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0(1-\alpha t_0)(1-g\sqrt{\alpha t_0})]} dt} \quad (13)$$



a



b



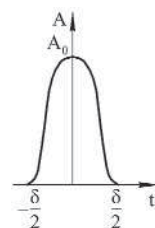
v

**Рис. 3.** Закономерности изменения напряжения (а), согласно (6), количества оставшихся волокон (б), согласно (12), и сигналов АЭ (в), согласно (18), в относительных единицах при деформировании и разрушении композиционного материала при действии поперечной силы.

Скорость деформирования:  
 1 -  $\alpha=10$ ; 2 -  $\alpha=20$ ; 3 -  $\alpha=40$ ; 4 -  $\alpha=50$ .  $v_0=100000$ ,  
 $r=10000$ ,  $g=0,1$ .  $\bar{\sigma}_0=0,08715395010584848$ .

Время начала разрушения:  
 1 -  $\tilde{t}_0=0,01$ ; 2 -  $\tilde{t}_{01}=0,005$ ; 3 -  $\tilde{t}_{02}=0,0025$ ; 4 -  $\tilde{t}_{03}=0,002$

**Рис. 4.** Импульс возмущения, формируемый при разрушении элемента композиционного материала



Так как разрушение каждого элемента начинается при некотором пороговом напряжении  $\sigma_0$ , то, безусловно, амплитуда импульса возмущения будет определяться напряжением разрушения. Другими словами, чем больше напряжение разрушения, тем большей будет амплитуда импульса возмущения. Поэтому будем считать, что

$$A_0(t) = \beta \sigma(t),$$

где  $\beta$  — коэффициент пропорциональности. Тогда, в общем случае, импульс возмущения будет иметь вид

$$A(t, \tau) = A_0(t) a(\tau), \quad (14)$$

где  $a(\tau)$  — функция, определяющая форму импульса возмущения.

Будем считать, что функция  $a(\tau)$  одинакова для всех разрушаемых элементов и имеет единичную амплитуду. Тогда, с учетом (6), выражение (14) перепишем в виде

$$A(t, \tau) = \beta \sigma(t) a(\tau) = \beta [\alpha t(1-\alpha t)(1-g\sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0(1-\alpha t_0)(1-g\sqrt{\alpha t_0})] a(\tau), \quad (15)$$

где  $A_0$  — амплитуда одиночного импульса возмущения.

Для результирующего смещения  $U(t)$ , формируемого при разрушении элементов на интервале времени  $[t-\delta/2, t+\delta/2]$ , можно записать

$$U(t) = \int_{t-\frac{\delta}{2}}^{t+\frac{\delta}{2}} A_0(t) a(\tau) D(t+\tau) d\tau. \quad (16)$$

С учетом того, что длительность одиночного импульса возмущения  $\delta$  намного меньше времени протекания процесса разрушения, то на интервале времени  $[t-\delta/2, t+\delta/2]$  величины  $D(t)$  и  $A_0(t)$  можно считать постоянными. Тогда, с учетом (14), выражение (16) запишем в виде

$$U(t) = D(t) A_0(t) \int_{t-\frac{\delta}{2}}^{t+\frac{\delta}{2}} a(\tau) d\tau. \quad (17)$$

Интеграл в (17) обозначим  $\delta_s$ . Его численное значение определяется формой одиночного импульса возмущения и имеет размерность времени. С учетом этого, а так же (13) и (15), выражение (17) будет иметь вид, представленный выражением (18), где  $U_0 = N_0 \beta \delta_s$  — максимально возможное смещение при мгновенном разрушении образца композиционного материала, состоящего из  $N_0$  элементов.

$$\begin{aligned}
 U(t) = & U_0 v_0 [\alpha t (1 - \alpha t) (1 - g(\alpha t)^{\frac{1}{2}}) - \alpha t_0 (1 - \alpha t_0) (1 - g(\alpha t_0)^{\frac{1}{2}})] \times \\
 & \times e^{r[\alpha t (1 - \alpha t) (1 - g\sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0 (1 - \alpha t_0) (1 - g\sqrt{\alpha t_0})]} \times \\
 & - v_0 \int_{t_0}^t e^{r[\alpha t (1 - \alpha t) (1 - g\sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0 (1 - \alpha t_0) (1 - g\sqrt{\alpha t_0})]} dt \\
 & \times e^{t_0}
 \end{aligned} \quad (18)$$

Отметим, что электрический сигнал на его выходе широкополосного приемного преобразователя АЭ, будет полностью повторять импульс смещения, описываемый выражением (18). Поэтому в дальнейшем будем говорить о сигнале АЭ.

Результаты моделирования сигналов АЭ в виде графиков  $\tilde{U}(t) = U(t)/U_0$ , представленных в относительных единицах, согласно (18), для принятых выше условий моделирования числа оставшихся элементов при разрушении композиционного материала, показаны на рис. 3, в. При моделировании, как и ранее, принимали, что изменяется в пределах от  $\alpha=10$  до  $\alpha=50$ . Пороговое напряжение разрушения для всех скоростей деформирования равно  $\tilde{\sigma}_0 = 0,08715395010584848$ . Значения времени начала разрушения для  $\alpha=10$ ,  $\alpha=20$ ,  $\alpha=40$  и  $\alpha=50$ , соответственно, составляли:

$$\tilde{t}_0 = 0,01; \tilde{t}_{01} = 0,005; \tilde{t}_{02} = 0,0025; \tilde{t}_{03} = 0,002.$$

Все величины заданы в относительных единицах, а  $\alpha$  приведена к безразмерной величине. Значение параметра  $g$  равно  $g=0,1$ . Значения параметров  $v_0$  и  $r$  приняты равными  $v_0=100000$  и  $r=10000$ .

Полученные результаты (рис. 3, в) показывают, что формируемые сигналы АЭ имеют малые длительности, которые уменьшаются с возрастанием  $\alpha$ . Уменьшение длительности сигнала АЭ сопровождается возрастанием его амплитуды. Подобные закономерности изменения параметров сигналов АЭ обусловлены тем, что с возрастанием  $\alpha$  уменьшается время протекания процесса разрушения и увеличивается его интенсивность, т. е. увеличивается количество элементов, разрушаемых в единицу времени. На рис. 5 показаны зависимости изменения числа оставшихся элементов и сигналы АЭ для каждой скорости деформирования материала отдельно.

Из рис. 5, а, в, д, ж видно, что с возрастанием  $\alpha$  наблюдается постепенное увеличение крутизны падения кривых изменения количества оставшихся элементов во времени. Такое падение кривых свидетельствует об увеличении интенсивности (скорости) разрушения, т. е. происходит постепенное возрастание количества элементов, разрушаемых в единицу времени, и, естественно, уменьшается количества оставшихся элементов в единицу времени ( $dN/dt$ ). Увеличение интенсивности разрушения сопровождается изменением и параметров формируемых сигналов АЭ. Наблюдается

увеличение их амплитуды и уменьшение длительности (рис. 5, б, з, е, з). Проведем оценки изменения параметров при увеличении скорости деформирования композиционного материала.

Выше было отмечено, что отношение времени протекания процесса разрушения ко времени начала разрушения (ввода нагрузки) составляет величину порядка  $\sim 10^{-3}$ . Обработка полученных данных в относительных единицах показывает, что при  $\alpha=10$  максимальная амплитуда сигнала АЭ равна  $\tilde{U}_{\max} = 3,7$ . С увеличением  $\alpha$  в 2 раза амплитуда сигнала АЭ возрастает в 2,24 раза, при увеличении  $\alpha$  в 4 раза величина  $\tilde{U}_{\max}$  возрастает в 5,8 раза, а при увеличении  $\alpha$  в 5 раз эта величина возрастает в 6,5 раза (рис. 5, б, з, е, з). Длительность переднего фронта сигналов АЭ  $\tilde{\tau}_0$  соответствует моменту времени, когда амплитуда сигнала имеет максимальное значение  $\tilde{U}_{\max}$ . При  $\alpha=10$  длительность

переднего фронта равна  $\tilde{\tau}_0 = 0,0000087$ .

С увеличением  $\alpha$  в 2 раза  $\tilde{\tau}_0$  уменьшается в 1,24 раза, при увеличении  $\alpha$  в 4 раза  $\tilde{\tau}_0$  уменьшается в 1,64 раза, а при увеличении  $\alpha$  в 5 раз  $\tilde{\tau}_0$  уменьшается в 1,9 раза (рис. 5, б, в, з, е, з). Наблюдается и сжатие сигнала АЭ во времени. В виду асимптотического характера изменения заднего фронта формируемых сигналов АЭ их длительность  $\tilde{\tau}_0$  определим из выполнения следующего условия отношения амплитуд

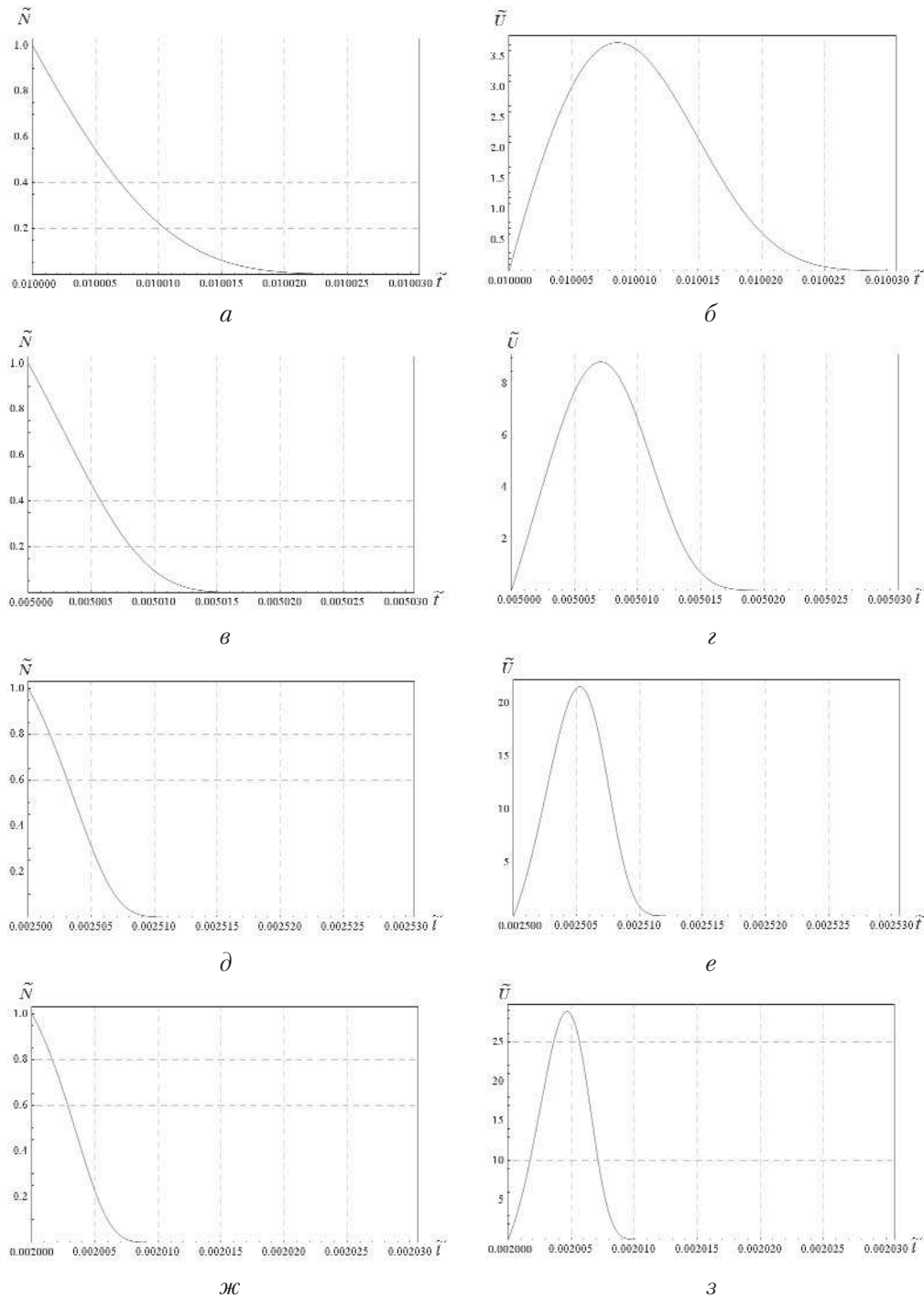
$$\tilde{U}(\tilde{t} = \tilde{\tau}) \ll \tilde{U}_{\max}(\tilde{t} = \tilde{\tau}_0) \quad .$$

При этом для длительности сигнала АЭ мы можем записать

$$\tilde{\tau} = m\tilde{\tau}_0 \quad (19)$$

где  $m$  — целое число, порядка нескольких единиц.

Для оценки  $m$  рассмотрим отношение амплитуд сигналов  $\tilde{U}(\tilde{t} = \tilde{\tau}) / \tilde{U}_{\max}(\tilde{t} = \tilde{\tau}_0)$ , согласно полученным данным, для различных значений  $m$ . Так, при  $\alpha=10$  и  $m=3$  отношение амплитуд составляет 0,003, а при  $m=4$  это отношение уже равно  $5 \cdot 10^{-6}$ . При  $\alpha=20$  и  $m=2,5$  отношение амплитуд составляет 0,014, а при  $m=2,8$  это отношение уже равно 0,00012. При  $\alpha=40$  и  $m=2$  отношение амплитуд составляет 0,00046. При  $\alpha=50$  и



**Рис. 5.** Закономерности изменения количества оставшихся элементов (*а, в, д, ж*), согласно (12) и сигналов АЭ (*б, г, е, з*), согласно (18), в относительных единицах при разрушении композиционного материала под действием сдвигающей нагрузки.

Скорость деформирования:

$$a, б - \alpha = 10; в, г - \alpha = 20; д, е - \alpha = 40; ж, з - \alpha = 50. v_0 = 100000, r = 10000, g = 0,1. \sigma_0 = 0,08715395010584848.$$

Время начала разрушения:

$$a, б - \tilde{t}_0 = 0,01; в, г - \tilde{t}_{01} = 0,005; д, е - \tilde{t}_{02} = 0,0025; ж, з - \tilde{t}_{03} = 0,002;$$

$m = 2$  отношение амплитуд составляет 0,00034. Если ограничиться третьим знаком в отношениях амплитуд, то при увеличении  $\alpha$  в 2 раза  $\tilde{\tau}$  уменьшается в 1,67 раза, при увеличении  $\alpha$  в 4 раза

$\tilde{\tau}$  уменьшается в 2,72 раза, а при увеличении  $\alpha$  в 5 раз  $\tilde{\tau}$  уменьшается в 3,33 раза.

Следует отметить, что возрастание скорости деформирования приводит так же к трансформа-



ции сигнала АЭ, форма которого постепенно приближается к треугольному сигналу (рис. 5).

Полученные результаты хорошо соответствуют принятым условиям моделирования – увеличение скорости деформирования должно приводить к уменьшению времени процесса разрушения (времени начала формирования сигнала АЭ) и увеличению его интенсивности (увеличению амплитуды сигнала АЭ).

### Выводы

Разработана модель для числа оставшихся элементов композиционного материала во времени, представленного в виде пучка волокон, с учетом кинетики разрушения при нагружении материала продольной силой, а так же модель формируемого сигнала АЭ. Показано, что при протекании процесса разрушения композиционного материала кривая изменения оставшихся элементов во времени имеет непрерывный характер падения. Непрерывность процесса разрушения сопровождается формированием непрерывного сигнала АЭ, который характеризуется ускоренным нарастанием переднего фронта. При этом задний фронт сигнала имеет релаксационный характер падения. Анализ разработанных моделей, при условии увеличения скорости деформирования и постоянстве напряжения начала разрушения, показал следующее. С возрастанием скорости деформирования наблюдается уменьшение времени протекания процесса разрушения, что сопровождается возрастанием крутизны падения кривых изменения оставшихся элементов (возрастание интенсивности или скорости разрушения). При этом происходит изменение параметров и формы формируемого сигнала АЭ. Наблюдается возрастание амплитуды сигнала, уменьшение его длительности и трансформация сигнала в сигнал треугольной формы. Полученные результаты согласуются с существующими представлениями о влиянии скорости деформирования на развитие процесса разрушения. В тоже время, интерес представляют исследования закономерностей процесса разрушения композиционных материалов и параметров формируемых сигналов АЭ с учетом изменения 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. Nechad H. Creep ruptures in heterogeneous materials / H. Nechad, A. Helmstetter, R. E. Guerjouna, D. Sornette // Phys. Rev. Lett. – 2005. – v. 94. – № 4. – P. 4.

7. 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.

8. 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.

9. Turcotte D.L. Micro and macroscopic models of rock fracture / D.L. Turcotte, W.I. Newman, R. Shcherbakov // Geophes. J. Intern. – 2003. – V. 152. – No 3. – P. 718–728.

10. Shcherbakov R. On modeling of geophysical problems: A dissertation for degree of doctor of philosophy / Robert Shcherbakov. – Cornell university, 2002. – 209 p.

11. Guarino A. An experimental test of the critical behavior of fracture precursors / A. Guarino, A. Garcimartin, S. Ciliberto // Eur. Phys. J.B. – 1998. – v. 6. – № 1. – P. 13–24.

12. Guarino A. Failure time and microcrack nucleation / S. Ciliberto, A. Garcimartin // Europhys. Lett. – 1999. – V. 47. – № 4. – P. 456–461.

13. Johanson A., Sornette D. Critical ruptures // Europ. Phys. J. – 2000. – B18. – P. 163–181.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. Филоненко С.Ф. Акустическая эмиссия при нагружении композиционных материалов / С.Ф. Филоненко, В.М. Калита, А.П. Космач // Вісник НАУ. – 2010. – № 1. – С. 61–70.

19. Маламедов И.М. Физические основы надежности. – Л.: Энергия, 1970. – 152 с.