

УДК 620.179:534.6

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

### МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

#### *Анотація*

*Розглянуто модель формування сигналу акустичної емісії при розвитку крихкої тріщини в композиційних матеріалах. Наведено результати моделювання сигналів акустичної емісії при різних співвідношеннях параметрів матеріалів і швидкості їх навантаження.*

#### *Abstract*

*The model of acoustic emission signal formation is reviewed at development a friable crack in composite materials. The results of acoustic emission signals simulation are adduced at different ratio of stuffs parameters and loading speed.*

#### **Введение**

Одним из направлений теоретических исследований акусто-эмиссионного излучения, является изучение процессов формирования сигналов акустической эмиссии (АЭ) при деформировании и разрушении материалов. Разработка моделей, безусловно, имеет важное значение и позволяет не только расширять представления о явлении АЭ, но и определять закономерности изменения их

параметров с приближением к разрушению с учетом наличия влияющих факторов. В первую очередь, это относится к моделям сигналов АЭ, которые базируются на физических представлениях механики разрушения, и в значительно большей степени учитывают механизмы процессов, возникающие и развивающиеся в структуре материала при его нагружении. Подобные модели рассмотрены в ряде работ [1–4].

В работе [1] рассматриваются модели сигналов АЭ, основанные на представлениях дислокационного образования микротрещины, т.е. перемещение дислокаций, их остановка на препятствиях и преодоление препятствий — образование микротрещины перед препятствием, за препятствием или проходящей через препятствие. Анализируя изменение напряжений в материале при развитии двух основных процессов (релаксационный и акселерационный) в [1] получены соотношения для описания формы импульсов АЭ. При этом отмечено, что не зависимо от вида развивающегося процесса первоначальные сигналы АЭ имеют форму видеоимпульса. Модель сигнала АЭ при развитии хрупкого разрушения материала



(образования хрупкой трещины) получена в [2]. Она основана на представлении того, что при медленном растяжении идеализированного твердого тела с увеличением расстояния между его атомами до некоторого критического значения  $r_m$  происходит разрыв связи с выделением накопленной упругой энергии, которая равна работе, затраченной на перемещение атомов от значения постоянной решетки  $a$  до  $r_m$ . Возмущение от первой разорванной связи передается поперечным движением на соседние связи и вызывает их разрыв. При этом предполагается, что каждому элементарному акту релаксации единичной связи соответствует единичный импульс АЭ. В [2] разрушение связей для кубической решетки имеет форму квадрата, площадь которого увеличивается во времени с распространением разрушения до полного разделения твердого тела. Анализ процесса разрушения позволил получить выражение для усредненной кривой изменения числа разорванных связей во времени, а так же для импульса АЭ в виде  $U_{AB} = ate^{-Dt}$ , где  $D$  — постоянная затухания потока импульсов, обусловленная действием принципа Сенана, и связанная с размерами поля неоднородности (приблизительно можно считать, что  $D \approx \delta$  — параметр затухания);  $a$  — постоянная решетки. Следует отметить, что рассмотренные модели не позволяют объяснить разнообразие форм и закономерностей изменения параметров реальных сигналов АЭ.

В работе [3] на основе представлений механики разрушения была разработана модель сигнала АЭ, который формируется при образовании в материале трещины. При этом считалось, что материал во всем объеме является однородным, кроме некоторой малой области, которую моделировали совокупностью из  $N_0$  элементарных объемов с определенным распределением их по прочности. При нагружении материал деформируется упруго, а трещина развивается в области неоднородности. Анализ процесса разрушения позволил получить выражение для сигнала АЭ от трещины, развивающейся во времени, в виде соотношения  $U_T(t) = U_0 \delta_S \alpha^3 t^2 \exp(-bat)$ , где  $U_0 = N_0 ck$  — максимально возможное смещение при разрушении без дисперсного по  $\sigma_P$  (прочности) материала;  $c, b$  — коэффициенты, зависящие от физико-механических характеристик материала;  $k$  — постоянная, связанная с амплитудой элементарного импульса возмущения, из которых формируется сигнал АЭ;  $\delta_S$  — длительность такого элементарного импульса возмущения ( $\delta_S = \text{const}$ );  $N_0$  — количество элементарных импульсов возмущения;  $\alpha$  — скорость нагружения материала. Моделирование сигналов АЭ, в соответствии с полученным выражением, позволило определить

основные закономерности трансформации формы и изменения параметров сигналов АЭ в зависимости от скорости развития процессов разрушения, скачкообразного подрастания трещины, физико-механических характеристик материалов и площади образующейся трещины [4, 5], что имеет хорошее согласование с данными экспериментальных исследований.

Существует и ряд других моделей АЭ. Например, в работе [6] рассмотрена модель излучения сигналов АЭ при предположении, что нагружаемый материал состоит из  $N$  ячеек, каждая из которых имеет критическое напряжение разрыва  $\sigma$ , а весь материал характеризуется некоторой функцией распределения ячеек по прочности в начальный момент времени  $t=0$ , т.е.  $N(\sigma, 0)$ . При приложении к материалу нагрузки будет происходить термоактивированное и механическое разрушение ячеек. При этом ячейки с критическим напряжением разрыва большим приложенного напряжения ожидают термоактивированный разрыв на протяжении некоторого времени, а ячейки с критическим напряжением разрыва меньшим или равным приложенному напряжению разрушаются механическим образом. Так же считается, что разрушение каждой ячейки сопровождается излучением одного импульса АЭ. Основываясь на данных допущениях, в [6] получено выражение для интенсивности излучения сигналов АЭ. Сопоставление теоретических и экспериментальных результатов, как отмечают авторы, имеет удовлетворительное согласование.

В [7] рассмотрена структурно-имитационной модель АЭ, в которой неоднородность состояния материала характеризуется разбросом по времени до разрушения его элементов, и зависит от структурно чувствительного коэффициента  $\gamma$ . При этом считается, что поврежденность материала в некотором контролируемом объеме  $V$  определяется концентрацией  $C$  микротрещин, которые образуются во времени. При увеличении концентрации  $C$  микротрещин в некоторой области материала до определенной критической величины происходит объединение микротрещин с образованием трещины более высокого ранга. Затем происходит их объединение, что, в конечном результате, приводит к разрушению материала. В процессе роста трещин разного ранга происходит излучение сигналов АЭ. Основываясь на данных предположениях и кинетической теории прочности [8], в [7] получены временные зависимости параметров АЭ на этапе делокализованного разрушения любого масштабного уровня в условиях неоднородности структурно-напряженного состояния материала. При этом, как отмечают авторы, в первую очередь, разрушаются, излучая упругую волну и выходя из процесса,

наименее долговечные структурные элементы, что обуславливает временную неоднородность процесса разрушения и позволяет проводить количественные оценки данного процесса.

Одной из модельных концепций, часто используемой при описании хрупкого разрушения композиционных материалов, является представление материала в виде пучка разрушаемых волокон [9–12]. При этом процесс разрушения рассматривается, как процесс последовательного разрушения волокон при заданной или возрастающей нагрузке с равномерным перераспределением напряжений на оставшиеся волокна или на волокна, расположенные вблизи разрушившегося волокна, что положено в основу акусто-эмиссионной модели, рассмотренной в [13, 14]. При этом считается, что материал состоит из  $N_0$  волокон, которые упруго деформируются до их разрушения. При разрушении волокна происходит излучение одного импульса АЭ, напряжение перераспределяется на оставшиеся волокна, а скорость разрушения волокон описывается эмпирическим выражением вида  $v(t) = v_0[\sigma(t)/\sigma_0]^p$ , где  $v_0$  — начальная скорость разрушения, соответствующая начальному напряжению  $\sigma_0$ ;  $p$  — показатель степени, значение которого лежит в диапазоне величин от 2 до 5. С учетом данных допущений, и того, что упругая энергия, запасенная в одиночном волокне во времени до разрушения высвобождается в виде энергии АЭ события с некоторым коэффициентом пропорциональности, являющимся константой, в [13, 14] получены соотношения для скорости изменения оставшихся волокон и скорости высвобождения энергии событий АЭ. При этом показано, что с приближением к полному разрушению происходит возрастание скорости высвобождения энергии АЭ и, как следствие, накопленной энергии событий АЭ, что имеет согласование с экспериментальными результатами [15–17]. Однако в момент времени, соответствующий разрушению, возникает разрыв функции изменения накопленной энергии событий АЭ (функция стремится к  $\infty$ ), что является не совсем корректным. Это, в свою очередь, указывает на то, что разработанная модель не позволяет получить модельный сигнал (событие) АЭ, возникающий при разрушении композиционного материала.

В настоящей работе будет рассмотрена модель сигнала АЭ, формируемого при разрушении композиционного материала, основанная на кинетическом механизме разрушения элементарных участков. Будет показана трансформация формы сигнала АЭ в зависимости от скорости приложения нагрузки, связанной со скоростью развития процесса разрушения материала, и его физико-механических характеристик.

### Модель сигнала акустической эмиссии

Композиционные материалы, как известно [18], состоят из основы (матрицы) и армирующих компонент (наполнителей). При производстве композитов в качестве матрицы используются металлы, керамики и пластмассы, а в качестве наполнителя — металлические нити, монокристаллические "усы", многокомпонентные волокна, ткани, а так же дисперсные частицы карбидов, боридов, оксидов, алмазов, кубического нитрида бора и других материалов [19, 20]. Поэтому, как отмечено в [11–15], к разрушению композиционных материалов в полной мере применима модель разрушения пучка-волокон.

Предположим, что мы имеем образец композиционного материала, который состоит из  $N_0$  волокон или элементов. Будем считать, что при приложении к такому образцу напряжения каждый элемент деформируется упруго, вплоть до его разрушения. Полагаем, что все элементы обладают одинаковой прочностью. Разрушения образца представляет собой процесс последовательного разрушения его элементов. В линейном приближении [13, 14] скорость изменения оставшихся элементов (волокон) при развитии процесса разрушения описывается уравнением

$$\frac{d}{dt} [N_0 - N_f(t)] = -v(\sigma) [N_0 - N_f(t)], \quad (1)$$

где  $N_0$  — исходное (начальное) количество элементов;  $N_f(t)$  — число разрушившихся элементов, зависит от времени;  $[N_0 - N_f(t)]$  — число оставшихся элементов;  $v(\sigma)$  — скорость развития процесса разрушения, которая зависит от прикладываемого напряжения  $\sigma(t)$ .

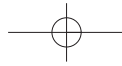
Для удобства примем, что число оставшихся элементов равно  $N = [N_0 - N_f(t)]$ . Тогда выражение (1) запишем в виде

$$\frac{dN}{dt} = -v(\sigma)N. \quad (2)$$

Процесс разрушения элементов описываемый выражением (2) по сути, является кинетическим процессом. Как уже отмечалось, в [13, 14] использовалось эмпирическое выражение для  $v(\sigma)$ . Однако, согласно кинетической теории [21, 22] следует воспользоваться хорошо известной формулой Журкова С.Н., согласно которой состояние каждого элемента можно характеризовать временем до разрушения или временем ожидания разрушения.

$$\tau = \tau_0 e^{\left( \frac{U_0 - \gamma\sigma(t)}{kT} \right)}, \quad (3)$$

где  $\tau_0$  — параметр, совпадающий по величине с периодом тепловых колебаний атомов решетки



твердого тела;  $U_0$  – начальная энергия активации (величина начального энергетического барьера) процесса разрушения;  $\sigma(t)$  – напряжение материала, обусловленное механической нагрузкой, уменьшающее начальную энергию активации, активирующее процесс разрушения и создающее его направленность;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура;  $\gamma$  – структурно чувствительный коэффициент (характеристика чувствительности материала к напряжению).

Тогда скорость процесса разрушения будет равна  $v \approx \tau^{-1}$ . С учетом (3) можно записать

$$v = \frac{1}{\tau_0} e^{-\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma(t)}{kT}\right)}, \quad (4)$$

Нагрузку, приложенную к образцу, представим в виде  $\sigma(t) = \alpha t$ , где  $\alpha$  – скорость изменения нагрузки, которая является постоянной величиной, и введем обозначения  $\chi = \frac{\gamma\alpha}{kT}$  и  $t_0 = \frac{U_0}{\gamma\alpha}$ . С учетом введенных допущений выражение (2) примет вид

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{1}{\tau_0} e^{-\chi(t_0 - t)} N. \quad (5)$$

Из (5) получим

$$\frac{dN}{N} = -\frac{1}{\tau_0} e^{-\chi(t_0 - t)} dt. \quad (6)$$

Проведя интегрирование выражения (6), с учетом того, что при начальных условиях в момент времени  $t = 0$  значение  $N_f(t)$  равно нулю, т.е.  $N_f(0) = 0$  получим

$$\ln \frac{N}{N_0} = \frac{1}{\tau_0 \chi} e^{-\chi t_0} (1 - e^{\chi t}). \quad (7)$$

Выражение (7) после преобразования можно записать в виде

$$\ln \frac{N}{N_0} = \frac{1}{\tau_0 \chi} (e^{-\chi t_0} - e^{-\chi(t_0 - t)}), \quad (8)$$

или

$$\ln \frac{N_0}{N} = \frac{1}{\tau_0 \chi} (e^{-\chi(t_0 - t)} - e^{\chi t_0}). \quad (9)$$

Из уравнения (9) получим

$$\frac{N_0}{N} = e^{\tau_0 \chi} \frac{1}{\tau_0 \chi} (e^{-\chi(t_0 - t)} - e^{\chi t_0}). \quad (10)$$

Тогда количество не разрушившихся элементов будет описываться выражением

$$N(t) = N_0 e^{-\frac{1}{\tau_0 \chi} (e^{-\chi(t_0 - t)} - e^{\chi t_0})}. \quad (11)$$

Предположим, что во время разрушения каждого элемента генерируются импульсы АЭ. При этом положим, что одиночный импульс возмущения от разрушения одиночного элемента, который распространяется по материалу в виде импульса смещения, имеет вид приведенный на рис. 1, где  $A_0$  – амплитудное значение одиночного импульса смещения;  $\delta$  – длительность импульса смещения. Будем считать, что длительность импульса смещения  $\delta$  мала и намного меньше процесса разрушения образца. Релаксационные процессы при распространении импульса смещения рассматривать не будем. При этом считаем, что импульс смещения распространяется без затухания. В этом случае результирующий сигнал будет определяться числом импульсов, произведенных разрушенными элементами в единицу времени, т.е. пропорционально скорости

изменения числа элементов –  $U(t) \sim \left| \frac{dN}{dt} \right|$ .

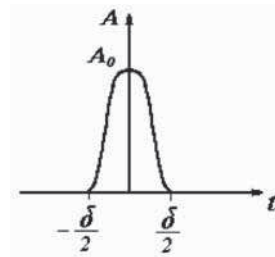


Рис. 1. Импульс возмущения при разрушении элементарного объема

Из выражения (11) получим

$$D = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \frac{N_0}{\tau_0} e^{-\chi(t_0 - t)} e^{-\frac{1}{\tau_0 \chi} (e^{-\chi(t_0 - t)} - e^{\chi t_0})}. \quad (12)$$

Будем считать, что  $A_0(t) \sim \sigma(t)$  или

$$A_0(t) = \beta \alpha t, \quad (13)$$

где  $A_0$  – амплитуда импульса возмущения;  $\beta$  – коэффициент пропорциональности.

Тогда импульс смещения, в общем виде, можно записать следующим образом

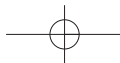
$$A(t, \tau) = A_0(t) a(\tau), \quad (14)$$

где  $a(\tau)$  – функция, определяющая форму сигнала, которую будем считать одинаковой для всех разрушаемых элементов, и которая имеет единичную амплитуду.

Тогда на интервале времени  $[t - \delta/2, t + \delta/2]$  результирующее смещение  $U(t)$  запишем в виде

$$U(t) = \int_{t - \delta/2}^{t + \delta/2} A_0(t) a(\tau) D(t + \tau) dt. \quad (15)$$





Так как длительность возмущения  $\delta$  намного меньше времени развития процесса разрушения, то можно считать, что на интервале времени  $[t-\delta/2, t+\delta/2]$  величины  $\Phi(t)$  и  $A_0(t)$  являются постоянными. С учетом этого выражение (15) запишем в виде

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

Численное значение последнего интеграла обозначим  $\delta_s$ . Он имеет размерность времени, а его численное значение определяется формой импульса возмущения. Поэтому выражение (16) запишем в виде

$$U(t) = A_0(t)D(t)\delta_s. \quad (17)$$

С учетом (12) и (13) амплитуда сигнала АЭ будет иметь вид

$$U(t) = \frac{N_0}{\tau_0} \alpha t \delta_s e^{-\chi(t_0-t)} e^{-\frac{1}{\tau_0\chi}(e^{-\chi(t_0-t)} - e^{-\chi t_0})}, \quad (18)$$

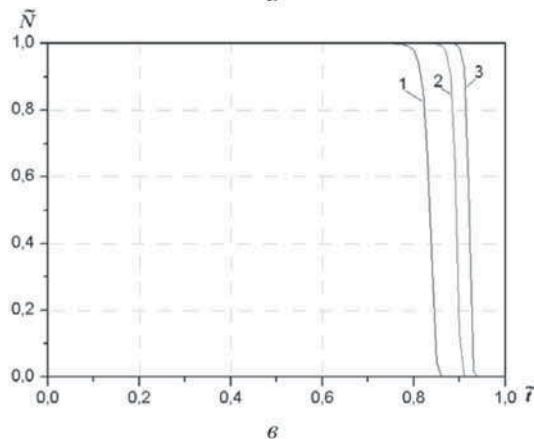
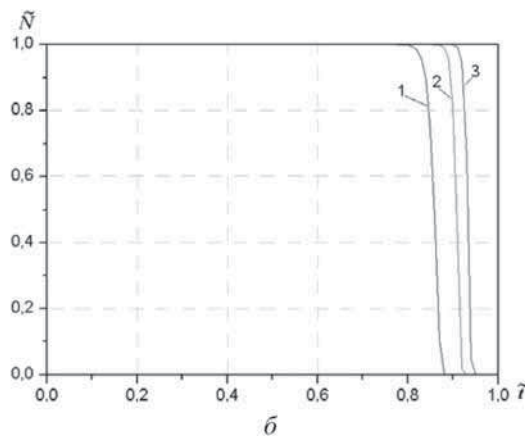
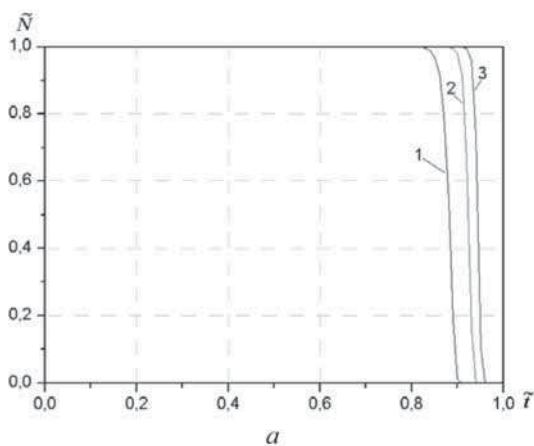
или

$$U(t) = u_0 t e^{-\chi(t_0-t)} e^{-\frac{1}{\tau_0\chi}(e^{-\chi(t_0-t)} - e^{-\chi t_0})}, \quad (19)$$

где  $u_0 = \frac{N_0}{\tau_0} \alpha \delta_s$  — максимально возможное смещение при мгновенном разрушении образца.

**Результаты численного моделирования**

С использованием (11) и (19) были промоделированы процесс разрушения, описываемый  $N(t)$ , и сигналы АЭ, описываемые  $U(t)$ . Расчеты зависимостей изменения во времени количества элементов, остающихся в процессе развития их разрушения, согласно (11), в виде графиков  $\bar{N}(t) = N(t)/N_0$ , представленных в нормированных единицах, приведены в на рис. 2. При проведении расчетов параметры, входящие в выражение (11), приведены к безразмерным величинам, а время нормировано на  $t_0$ . Соотношение величин  $\chi$  и  $1/\chi\tau_0$  выбирались исходя из того, что период собственных колебаний атомов вещества значительно меньше времени развития процесса разрушения (времени ввода нагрузки), т.е.  $(1/\chi\tau_0) \gg \chi$ . Расчеты проводились для следующих значений  $\chi$  и  $1/\chi\tau_0$ :  $\chi - 100, 150, 200$  (рис. 2, а-в);  $1/\chi\tau_0 - 100000, 66666, 50000$  (рис. 2, а);  $1/\chi\tau_0 - 1000000, 666666, 500000$  (рис. 2, б);  $1/\chi\tau_0 - 10000000, 6666666, 5000000$  (рис. 2, в). Изменение величины



**Рис. 2.** Изменение количества остающихся элементов во времени, согласно (11), при развитии процесса разрушения. Значения параметра  $\chi$  для кривых а, б и в равны: 1 – 100; 2 – 150; 3 – 200. Значения параметра  $1/\chi\tau_0$  равны: а – 1 – 100000; 2 – 66666; 3 – 50000; б – 1 – 1000000; 2 – 666666; 3 – 500000; в – 1 – 10000000; 2 – 6666666; 3 – 5000000



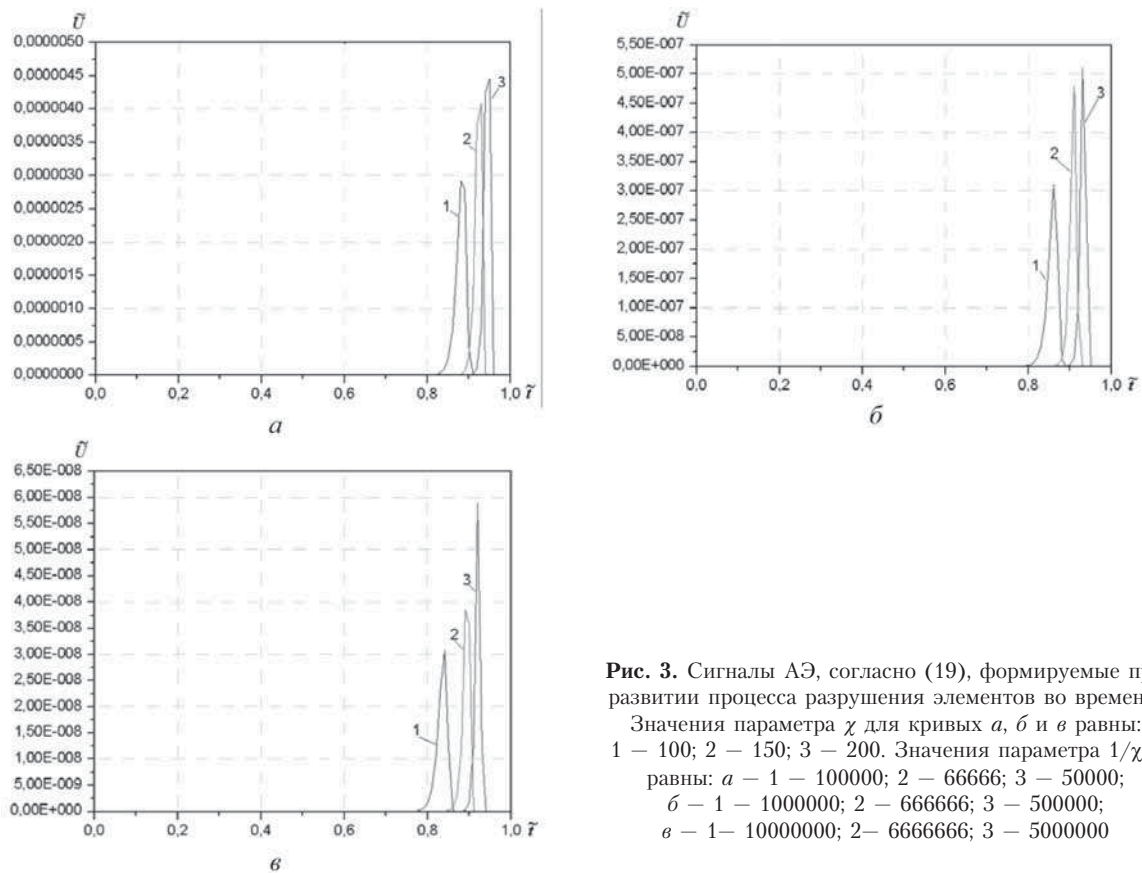


$1/\tau_0$  характеризует изменению свойств материала. Увеличение значения  $\chi$  характеризует увеличение уровня нагрузки (напряжения).

Результаты расчетов зависимости изменения во времени амплитуды сигналов АЭ, формируемых в процессе развития разрушения элементов, согласно (19), в виде графиков  $\bar{U}(t) = U(t)/U_0$ , представленных в нормированных единицах амплитудных значений, приведены на рис. 3. При проведении расчетов параметры, входящие в выражение (19), приведены к безразмерным величинам, а время нормировано на  $t_0$ . Соотношение величин  $\chi$  и  $1/\chi\tau_0$  соответствовали значениям, используемым при проведении расчетов зависимости изменения количества элементов, остающихся при развитии процесса разрушения:  $\chi - 100, 150, 200$  (рис. 3, а-в);  $1/\chi\tau_0 - 100000, 66666, 50000$  (рис. 3, а);  $1/\chi\tau_0 - 1000000, 666666, 500000$  (рис. 3, б);  $1/\chi\tau_0 - 10000000, 6666666, 5000000$  (рис. 3, в).

В соответствии с представленной моделью, развитие процесса разрушения рассматривается не как процесс механического разрушения, который происходит при  $\sigma = \sigma_p$ , а процесс, который протекает по термоактивационному механизму.

Это означает, что разрушение элементов происходит при напряжениях меньше критического напряжения разрушения (прочности), т.е. при  $\sigma < \sigma_p$ . Развитие такого процесса разрушения протекает непрерывно во времени и по своей сути является, так называемым, акселерационным процессом [22]. Это подтверждается результатами проведенных расчетов, приведенных на рис. 2. Из рис. 2 видно, что кривые изменения во времени оставшихся (не разрушившихся) элементов носят непрерывный спадающий характер с отсутствием скачка (критического времени с особенностями в производных), как это существует для модели механического разрушения, согласно [13, 14]. С возрастанием напряжения, приложенного к материалу (возрастание величины параметра  $\chi$ ), происходит увеличение крутизны кривых изменения оставшихся элементов и их сдвигу по оси времени в сторону больших значений (соответственно, 1, 2, 3 на рис. 2, а). При изменении физико-механических характеристик материала (изменение параметра  $1/\chi\tau_0$ ) закономерности изменения количества оставшихся элементов в процессе их разрушения сохраняются, т.е. с увеличением напряжения, приложенного к



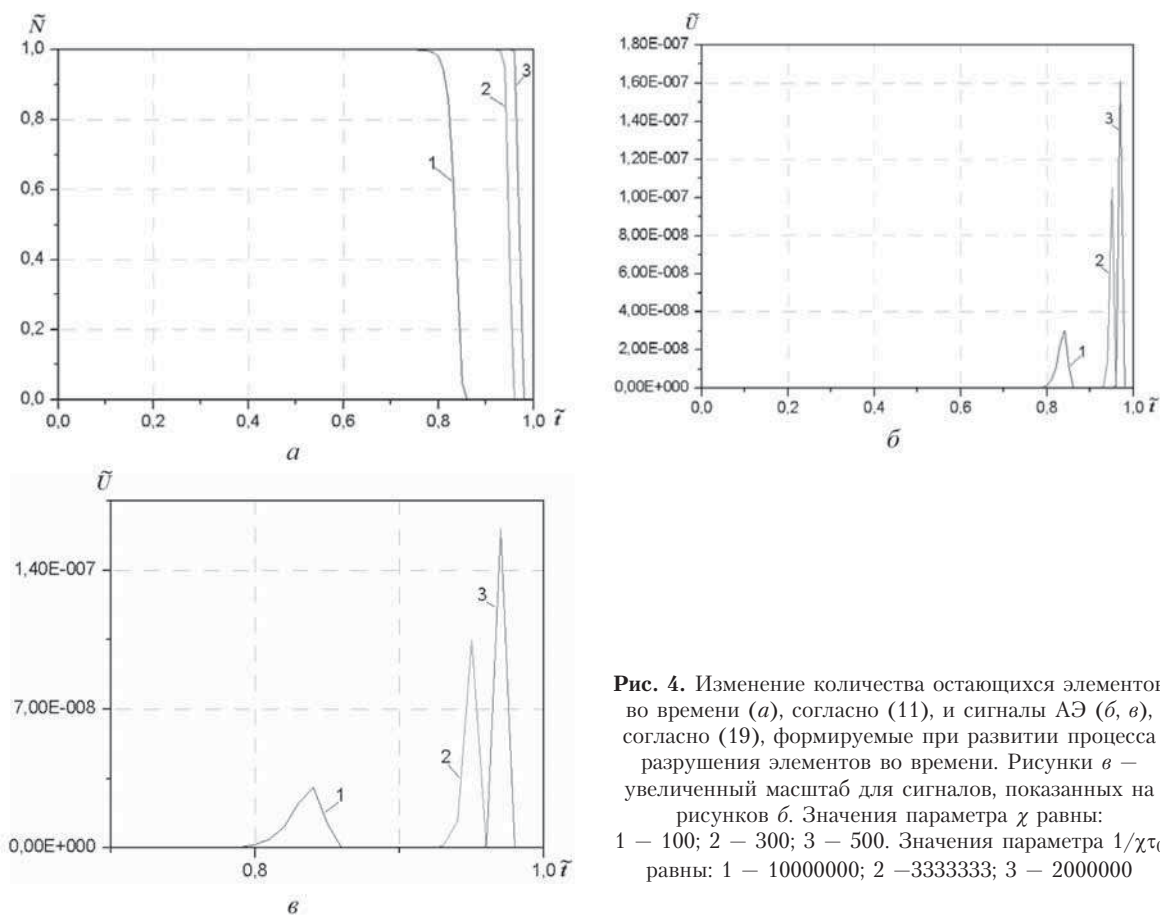
**Рис. 3.** Сигналы АЭ, согласно (19), формируемые при развитии процесса разрушения элементов во времени. Значения параметра  $\chi$  для кривых а, б и в равны: 1 – 100; 2 – 150; 3 – 200. Значения параметра  $1/\chi\tau_0$  равны: а – 1 – 100000; 2 – 66666; 3 – 50000; б – 1 – 1000000; 2 – 666666; 3 – 500000; в – 1 – 10000000; 2 – 6666666; 3 – 5000000

образцу, наблюдается увеличение крутизны переднего фронта кривых и их сдвиг по оси времени в сторону больших значений (рис. 2, б, в). В тоже время, анализ зависимостей изменения оставшихся элементов, приведенных на рис. 2, показывает, что на зависимостях имеется точка перегиба, которая хорошо наблюдается при увеличении разрешения по временному масштабу.

Непрерывность процесса разрушения элементов сопровождается формированием непрерывного сигнала АЭ с акселерационным нарастанием переднего фронта (рис. 3). При этом максимум сигнал АЭ отвечает моменту времени наиболее быстрого разрушения, что соответствует точке перегиба на зависимостях изменения числа оставшихся элементов во времени. При увеличении значения напряжения, приложенного к материалу (возрастание величины параметра  $\chi$ ), происходит возрастание амплитуды сигнала АЭ, его сдвиг по оси времени и уменьшение длительности, т.е. сжатие сигнала во времени или трансформация его формы (соответственно, 1, 2, 3 на рис. 3, а). При изменении физико-механических характеристик материала (изменение параметра  $1/\chi\tau_0$ ) закономерности изменения

параметров и трансформация формы сигнала АЭ сохраняются (рис. 3, б, в).

С дальнейшим увеличением напряжения, приложенного к материалу, т.е. с постепенным приближением напряжения к критическому значению  $\sigma \rightarrow \sigma_p$  закономерности изменения числа оставшихся элементов сохраняются. Наблюдается увеличение крутизны спада кривых и их сдвиг по оси времени (рис. 4, а). На рис. 4, а показаны зависимости изменения числа оставшихся элементов при увеличении значения параметра  $\chi$  (для кривых 2 и 3 значения параметра  $\chi$ , соответственно, равны: 300 и 500) по отношению к значению, принятому для начальных расчетов (для кривой 1 значение  $\chi$  равно 100, как и на рис. 2, а). При таком увеличении приложенного напряжения наблюдается увеличение амплитуды сигналов АЭ, уменьшение их длительности и трансформация формы. При больших значениях напряжения наблюдается постепенное исчезновение акселерационного характера возрастания амплитуды сигнала АЭ (рис. 4, б, в). На рис. 4, в показаны сигналы АЭ, изображенные на рис. 4, б, при увеличенном масштабе времени. Из рис. 4, в видно, что сигнал 3, по отношению к сигналам 1



**Рис. 4.** Изменение количества остающихся элементов во времени (а), согласно (11), и сигналы АЭ (б, в), согласно (19), формируемые при развитии процесса разрушения элементов во времени. Рисунки в — увеличенный масштаб для сигналов, показанных на рисунках б. Значения параметра  $\chi$  равны: 1 — 100; 2 — 300; 3 — 500. Значения параметра  $1/\chi\tau_0$  равны: 1 — 10000000; 2 — 3333333; 3 — 2000000



и 2, уже имеет почти треугольную форму. Такое изменение формы сигнала АЭ, очевидно, обусловлено тем, что с увеличением приложенного напряжения происходит "ослабление" термоактивационного механизма разрушения. Это проявляется в том, что при  $\sigma \rightarrow \sigma_p$  разрушение элементов происходит с увеличением скорости процесса и, как следствие, уменьшением времени его развития. Такому изменению характера процесса разрушения соответствует возрастание амплитуды и уменьшение длительности сигнала АЭ.

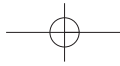
### Заключение

Разработана модель сигнала АЭ, основываясь на модели разрушения композиционного материала, представленного в виде пучка волокон. В отличие от существующей модели механического разрушения композиционного материала в виде пучка волокон, где скорость развития процесса разрушения задавалась степенным аппроксимирующим эмпирическим выражением, в разработанной модели используется кинетический подход или кинетические закономерности термоактивационного процесса разрушения, описываемые формулой Журкова С.Н. Использование такого подхода показало, что в сигналах АЭ отсутствуют скачки или критическое время развития процесса с особенностями в производных, которые характерны для моделей механического разрушения. При этом показано, что в процессе разрушения кривые изменения во времени не разрушившихся элементов носят непрерывный спадающий характер. С возрастанием напряжения, приложенного к материалу, происходит увеличение крутизны кривых изменения оставшихся элементов (возрастание скорости разрушения) и их сдвигу по оси времени в сторону больших значений. Непрерывность процесса разрушения сопровождается формированием непрерывного сигнала АЭ с акселерационным нарастанием переднего фронта и максимум амплитуды в момент времени наиболее быстрого развития процесса разрушения, что соответствует точке перегиба на зависимостях изменения числа оставшихся элементов во времени. Увеличение приложенного напряжения приводит возрастанию амплитуды сигнала АЭ, его сжатию и сдвигу по оси времени. При постепенном возрастании приложенного напряжения и его стремлении к критическому значению ( $\sigma \rightarrow \sigma_p$ ) происходит трансформация формы сигнала АЭ с исчезновением акселерационного характера роста его амплитуды, что связано с возрастанием скорости разрушения и уменьшения времени его протекания. Такое развитие процесса, вероятно, обусловлено перераспределением влияния термоактивационного и механического механизмов разрушения.

### Литература

1. Иванов В.И., Белов В.М. Акусто-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений. — М: Машиностроение, 1981. — 184 с.
2. Иванов В.И. Акустическая эмиссия в процессе когерентного разрушения // Доклады АН СССР. — т. 287, 1986. — № 2. — С. 302–306.
3. Бабак В.П., Филоненко С.Ф., Калита В.М. Модели формирования сигналов акустической эмиссии при деформировании и разрушении материалов // Технологические системы, 2002. — № 1(12). — С. 26–34.
4. Бабак В.П., Филоненко С.Ф., Калита В.М. Моделювання сигналів акустичної емісії при виникненні в матеріалі тріщин // Вісник НАУ, 2002. — № 1. — С. 5–10.
5. Бабак В.П., Филоненко С.Ф., Калита В.М. Модель сигнала акустической эмиссии при образовании в материале трещины с учетом релаксационных процессов // Технологические системы, 2002. — № 5(16). — С. 20–23.
6. Вайнберг В.Е., Кантор А.Ш., Лутацку Р.Г. Применение кинетической концепции разрушения для расчета интенсивности акустической эмиссии // Дефектоскопия, 1976. — № 3. — С. 89–96.
7. Носов В.В., Потанов А.И. Структурно-имитационная модель параметров акустической эмиссии // Дефектоскопия, 1996. — № 6. — С. 30–38.
8. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. — М.: Наука, 1974. — 560 с.
9. Curtin W.A. Theory of mechanical properties of ceramic-matrix composites // J. Am. Ceram. Soc. — 1991. — v. 75. — P. 2837–2845.
10. Newman W.I., Phoenix S.L. Time dependent fiber-bundles with local load sharing // Phys. Rev. E. — 2001. — v. 63. — 021507.
11. Lyakhovskiy V., Ben-Zion Y., Agnon A. Distributed damage, faulting and friction // J. Geophys. — 1997. — v. 102. — No 27. — P. 635–649.
12. Lyakhovskiy V., Podladchikov Y., Polikov A. Archeological model of a fractured solid // Tectonophysics. — 1993. — v. 226. — P. 187–198.
13. Shcherbakov R. On modeling of geophysical problems/ A dissertation for degree of doctor of philosophy (Cornell university). — 2002. — 209 P.
14. Turcotte D.L., Newman W.I., Shcherbakov R. Micro and macroscopic models of rock fracture // Geophys. J. Intern. — 2003. — v. 152. — No 3. — P. 718–728.
15. Guarino A., Garcimartin A., Ciliberto S. An experimental test of the critical behavior of fracture precursors // Europ. Phys. J. — 1998. — B 6. — P. 13–24.
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 //Euror. Phys. J. — 2000. — В18. — Р. 163–181.

18. Новиков Н.В., Майстренко А.Л., Кулаковский В.Н. Сопротивление разрушению сверхтвердых материалов. — К.: Наукова думка, 1993. — 220 с.

19. Композиционные материалы/ Под ред. Л. Браутмана, З. Крока. — М.: Мир, 1978. — 478 с.

20. Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов. — М.: Мир, 1982. — 232 с.

21. Маламедов И.М. Физические основы надежности. — Л.: Энергия, 1970. — 152 с.

22. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. — М.: Наука, 1974. — 560 с.

