



Филоненко С.Ф.

Национальный авиационный университет. Украина, г. Киев

## ВЛИЯНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА СИГНАЛЫ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

### Анотація

*Розглянуто вплив швидкості процесу механічного руйнування композиційного матеріалу на викривлення фронтів формованого сигналу акустичної емісії. Показано, що зростання швидкості руйнування на початковому етапі приводить до зростання крутості переднього фронту сигналу акустичної емісії, а на кінцевому етапі – до викиду амплітуди на задньому фронті. Також показано, що значна нерівномірність заднього фронту сигналу акустичної емісії обумовлена неперервною зміною швидкості руйнування композиційного матеріалу.*

### Abstract

*The influence a velocity of composite mechanical destruction process to garble fronts of shaped acoustic emission signal is considered. Is shown, that the ascending a velocity of destruction on a pioneering stage results to ascending a steepness of leading edge of acoustic emission signal, and at a final stage - to release of voltage on a back edge. As is exhibited, that the non-irregularity a back edge of acoustic emission signal is stipulated by continuous alteration a velocity of composite destruction.*

### Постановка проблемы

Диагностика технического состояния изделий является важным направлением в обеспечении их эксплуатационной надежности. При этом разработка методов диагностики охватывает широкий круг вопросов, связанных с теоретическими и экспериментальными исследованиями процессов разрушения разнообразных материалов. Одним из таких классов материалов являются композиционные материалы (КМ), которые характеризуются специфическими особенностями строения. Это многокомпонентные материалы, изготавливаемые разнообразными способами, и обладающие широким спектром физико-механических характеристик. Наличие такого спектра характеристик обеспечивает все большее их применение в различных видах техники. В тоже время, особенности строения КМ обуславливают и специфику процессов их разрушения, а так же специальные требования,

предъявляемые к изделиям из них. Поэтому вопросам разрушения КМ и методам диагностики их состояния в научной литературе уделяется большое внимание.

Как показывают результаты проведенных исследований, макроуровень процесса разрушения КМ определяется процессами его разрушения на субмикрорурвне. Это требует применения высокочувствительных методов, позволяющих получать в реальном времени большие объемы информации о протекании процессов разрушения КМ на всех уровнях. Одним из таких высокочувствительных методов является метод акустической эмиссии (АЭ). Он имеет широкое использование при исследовании разрушения материалов, находящихся под нагрузкой, и разработке методов технической диагностики. Однако применительно к КМ практическое применение метода ограничено. Это связано, в первую очередь, со сложностью теоретических исследований, результаты которых должны быть направлены на интерпретацию АЭ информации, регистрируемой в процессе разрушения КМ. В теоретических исследованиях важное значение имеют модели, описывающие процессы акустического излучения и формируемых сигналов АЭ с учетом действия не только различных факторов, но и не равномерности протекания процесса разрушения. Безусловно, что решение подобных задач на основе существующих представлений механики разрушения позволит получить основные закономерности изменения параметров АЭ, которые важны при разработке методов технической диагностики КМ.

### Анализ последних исследований и публикаций

В основе исследований явления АЭ, возникающего в процессе разрушения КМ, лежит представление КМ в виде пучка волокон [1–7]. Предполагается, что при нагружении КМ, состоящего из пучка волокон, происходит упругое их деформирование вплоть до разрушения. Так же предполагается, что процесс разрушения такого КМ представляет собой процесс последовательного разрушения волокон. При этом после разрушения каждого волокна напряжения распределяются либо на все оставшиеся волокна либо на волокна, расположенные в локальной области вблизи

разрушенного волокна. Такие допущения позволили получить соотношение для скорости изменения оставшихся волокон [8], которое используется при построении моделей сигналов АЭ.

В работе [8] рассмотрена модель процесса накопления энергии сигналов АЭ при разрушении волокон (элементов) КМ в приближении к моменту времени полного разрушения материала. Однако формируемый сигнал АЭ не был описан, так как исследуемые функции имели разрыв. Аналитическое выражение для сигнала АЭ было получено в работе [9]. Модель основывалась на термофлуктуационном механизме разрушения с учетом кинетики протекающего процесса. Основные закономерности изменения параметров сигналов АЭ для данной модели, с учетом влияющих факторов, были получены в работе [10]. Однако экспериментальные исследования [11] показали, что реальные сигналы АЭ по своей форме отличаются от модельных сигналов. Если модельные сигналы АЭ имеют акселерационный характер нарастания переднего фронта и резкое падение заднего фронта, то реальные сигналы противоположны им — характеризуются резким нарастанием переднего фронта и релаксационным падением заднего фронта. Такая форма сигналов АЭ, как было отмечено в [11], обусловлена преобладающим развитием механического разрушения элементов КМ. Как показали теоретические исследования, проведенные в [12], при механическом разрушении КМ форма формируемых сигналов АЭ хорошо согласуется с реальными сигналами. Было показано, что задний фронт сигнала АЭ имеет релаксационный характер и изменяется по закону, близкому к экспоненциальному. Исследования основных закономерностей изменения параметров сигналов АЭ при изменении влияющих факторов, таких как скорости нагружения КМ и его физико-механических характеристик, показали, что с изменением значений влияющих факторов не наблюдается изменений в форме формируемых сигналов АЭ. В тоже время, на реальных сигналах АЭ [11] релаксационное падение их амплитуды по заднему фронту не является гладким. Как показывают исследования, фиксируется изрезанность заднего фронта, т.е. наблюдаются выбросы и падения его амплитуды. Вероятно, что такая изрезанность заднего фронта реальных сигналов АЭ обусловлена неравномерностью протекания процесса разрушения. Исследования в данном направлении представляют безусловный интерес.

#### Задачи исследования

В работе будет показано, что изменение скорости развивающегося процесса механического разрушения КМ приводит к искажению передне-

го и заднего фронтов формируемого сигнала АЭ. Будет показано, что возрастание скорости на начальном этапе приводит к увеличению крутизны переднего фронта сигнала АЭ, возрастанию его амплитуды и уменьшению длительности, а на конечном этапе — к появлению выброса амплитуды на заднем фронте. Если процесс разрушения развивается с переменной скоростью (с ее уменьшением и возрастанием), то это приводит к появлению изрезанности заднего фронта сигнала АЭ. Так же будет показано, что возрастание скорости процесса разрушения приводит к возрастанию амплитуды сигнала АЭ, а уменьшение скорости — к ее падению.

#### Результаты исследований

Исследования закономерностей изменения параметров сигналов АЭ, проведенные в работе [12], были выполнены при условии, что разрушение КМ происходит не по термоактивационному механизму, а механическим образом. При этом анализировались сигналы АЭ, которые описываются выражением вида

$$U(t) = u_0 t \alpha v_0 e^{r\alpha t} e^{-\frac{v_0}{r\alpha}(e^{r\alpha t} - 1)}, \quad (1)$$

где  $u_0 = N_0 \psi \delta_s$  — максимально возможное упругое смещение, распространяющееся по материалу, при мгновенном разрушении образца с заданными физико-механическими характеристиками;  $N_0$  — начальное количество разрушаемых элементов КМ;  $\psi$  — коэффициент пропорциональности между механическим напряжением и амплитудой импульса возмущения, который формируется при разрушении одиночного элемента (является константой);  $\delta_s$  — величина, которая пропорциональна длительности возмущения при разрушении одиночного элемента;  $\alpha$  — скорость нагружения;  $v_0, r$  — постоянные, которые определяются физико-механическими характеристиками материала.

Сигналы АЭ, согласно (1), представляют собой видеопульс с резким нарастанием переднего и релаксационным падением заднего фронтов. Исследование закономерностей изменения параметров сигналов АЭ в работе [12] осуществлялись при условии постоянства скорости процесса разрушения КМ. Однако с кинетической точки зрения [13, 14] процесс разрушения состоит из двух стадий — зарождение трещины и ее распространение по материалу. Это означает, что при постоянной скорости нагружения материала  $\alpha$



(напряжение изменяется по линейному закону  $\sigma(t) = \alpha t$ ) первые локальные очаги разрушения приводят к перераспределению напряжений на соседние элементы, что вызывает увеличение напряжений на них. Это, в свою очередь, приводит к увеличению скорости роста трещины без изменения общей деформации материала, т.е. скорость роста трещины становится равной  $\alpha_T = \alpha + \alpha_1$ , где  $\alpha_1$  — локальное увеличение скорости роста трещины. Изменение скорости означает, что напряжения изменяются по другому линейному закону, т.е.  $\sigma_1(t) = (\alpha + \alpha_1)t$ . В тоже время, процесс разрушения может развиваться по различным сценариям с непрерывным возрастанием скорости или скачкообразным ее изменением, т.е. с увеличением и замедлением скорости роста трещины. Поэтому вклад локального изменения скорости  $\alpha_1$  в общую величину скорости роста трещины может иметь как положительный, так и отрицательный знак. Наличие различных сценариев роста трещины обусловлено рядом причин, которые, например, для металлов были исследованы в работах [15, 16]. Это в полной мере относится и к КМ [17]. Безусловно, что момент времени  $t = t_1$ , соответствующий изменению скорости роста трещины  $\alpha_T$  на величину  $\alpha_1$ , будет зависеть от физико-механических характеристик материала и величины приложенного напряжения.

Проведем моделирование сигналов АЭ с учетом изменения скорости роста трещины при механическом разрушении КМ с заданными физико-механическими характеристиками, напряжение на элементах которого изменяется по линейному закону, т.е.  $\sigma(t) = \alpha t$ . Будем рассматривать разрушение КМ, который состоит из  $N_0$  элементов, а параметры  $\nu_0$  и  $r$ , входящие в (1), будут постоянными величинами. При этом в некоторые моменты времени от начала процесса разрушения КМ будем изменять исходное значение  $\alpha$  на величину  $\alpha_1$ , которая может иметь как положительный (возрастание скорости), так и отрицательный (уменьшение скорости или торможение роста трещины) знак. Моделирование сигналов АЭ будем проводить с учетом непрерывности изменения напряжений, т.е. в момент времени  $t_1$ , соответствующий изменению скорости роста трещины  $\alpha_T$ , напряжения  $\sigma(t_1)$ , изменяемые с исходной скоростью, и  $\sigma_1(t_1)$ , изменяемые с

новой скоростью, равны между собой, что рассмотрено в работе [18].

Результаты моделирования сигналов АЭ в виде зависимостей  $\tilde{U}(t) = U(t)/u_0$ , представленных в относительных единицах, при различных временах изменения скорости роста трещины от начала процесса разрушения КМ показаны на рис. 1. При проведении расчетов параметры, которые входят в выражение (1), приведены к безразмерным величинам, а время представлено в нормированных единицах. Моделирование сигналов 1 (рис. 1, а, б) проводили при условии постоянства скорости процесса разрушения (скорости роста трещины), значение которой соответствовало скорости нагружения КМ, т.е.  $\alpha_T = \alpha = 10$ . При этом значения параметров  $\nu_0$  и  $r$  были приняты равными:  $\nu_0 = 100\,000$ ;  $r = 10\,000$ . Моделирование сигналов 2 (рис. 1, а, б) выполнялось при тех же значениях параметров  $\nu_0$  и  $r$ , а так же начальной скорости разрушения КМ, т.е.  $\nu_0 = 100\,000$ ;  $r = 10\,000$ ;  $\alpha_T = \alpha = 10$ .

Однако для сигнала 2 (на рис. 1, а) в момент времени  $\tilde{t}_1 = 0,0000020444$  происходило изменение скорости разрушения, величина которой стала равной  $\alpha_T = 14$  и сохранялась не измененной до полного разрушения КМ. Для сигнала 2 (на рис. 1, б) в момент времени  $\tilde{t}_2 = 0,000011244$  происходило изменение скорости разрушения, величина которой стала равной  $\alpha_T = 14$  и сохранялась не измененной до полного разрушения КМ. Фактически проводили моделирование изменения скорости роста трещины на начальном и конечном этапах развития процесса разрушения.

Результаты проведенного моделирования показывают, что при постоянной скорости процесса разрушения КМ сигнал АЭ представляет собой гладкий видеосигнал с быстрым нарастанием переднего фронта и релаксационным падением амплитуды по заднему фронту (сигнал 1, рис. 1, а, б). Изменение скорости развития процесса разрушения КМ приводит к искажению формы формируемого сигнала АЭ. Если скорость разрушения изменяется на начальном этапе развивающегося процесса, то происходит увеличение крутизны переднего фронта формируемого сигнала АЭ (сигнал 2, рис. 1, а). На рис. 1, а изменение крутизны переднего фронта соответствует моменту времени  $t_1$ . Увеличение скорости разрушения так же

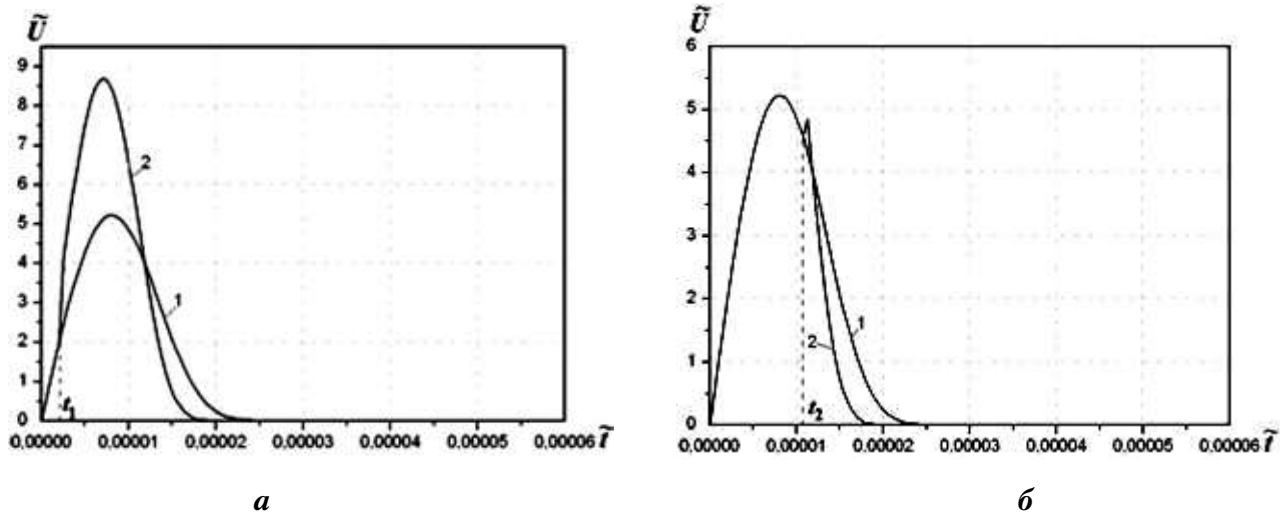


Рис. 1. Зависимости изменения сигналов АЭ во времени:

- a* – при постоянной и возрастающей скорости разрушения элементов КМ на начальном этапе;  
*б* – при постоянной и возрастающей скорости разрушения элементов КМ на конечном этапе.  
 1 – сигнал АЭ при постоянной скорости процесса разрушения –  $\alpha_T = \alpha = 10$ ;  
 2 – при начальной и возрастающей скорости процесса разрушения –  $\alpha_T = \alpha + \alpha_1 = 15$ .

Время изменения скорости разрушения от начала развития процесса  $\tilde{t}_1$  и  $\tilde{t}_2$  :  $\tilde{t}_1 = 0,0000020444$ ;  $\tilde{t}_2 = 0,000011244$

приводит к возрастанию амплитуды и уменьшению длительности сигнала АЭ, т.е. его сжатию во времени. Такое изменение параметров сигнала АЭ обусловлено, как показано в работе [12], возрастанием скорости разрушения, т.е. увеличением количества элементов КМ, разрушаемых в единицу времени. Если скорость разрушения изменяется на конечном этапе развивающегося процесса, то на заднем фронте формируемого сигнала АЭ появляется выброс амплитуды (сигнал 2, рис. 1, б). На рис. 1, б появление выброса амплитуды на заднем фронте сигнала соответствует моменту времени  $t_2$ . Увеличение скорости разрушения приводит и к уменьшению длительности сигнала АЭ, т.е. его сжатию во времени, что так же обусловлено, увеличением количества элементов КМ, разрушаемых в единицу времени.

Результаты исследований по влиянию изменения скорости роста трещины на конечном этапе процесса разрушения на параметры выброса амплитуды и параметры формируемого сигнала АЭ показаны на рис. 2. Графики на рис. 2 нормированы аналогично графикам рис. 1. При моделировании значения параметров  $v_0$  и  $r$  были приняты равными:  $v_0 = 100\,000$ ;  $r = 10\,000$ . Скорость разрушения КМ при моделировании сигнала 1 (рис. 2) была принята равной  $\alpha_T = \alpha = 10$ . Она оставалась постоянной на протяжении всего процесса разрушения. Для сигналов 2 и 3 (рис. 2) начальная скорость разрушения так же составля-

ла  $\alpha_T = \alpha = 10$ . Однако на конечном этапе развивающихся процессов в один и тот же момент времени, равный  $\tilde{t}_3 = 0,000010733$ , происходило изменение скорости разрушения, величины которых оставались не измененными до полного разрушения КМ. Для сигнала 2 (рис. 2) конечная скорость разрушения составляла  $\alpha_T = 11$ , а для сигнала 3 (рис. 2) – ее величина была принята равной  $\alpha_T = 14$ .

Из рис. 2 видно, что величина изменения скорости процесса разрушения КМ влияет на числовое значение амплитуды выброса формируемого сигнала АЭ, а так же его длительность. Обработка полученных данных (рис. 2) показала, что возрастание скорости роста трещины на конечном этапе процесса разрушения в 1,1 раза приводит к появлению выброса амплитуды на заднем фронте сигнала, величина которой по отношению к исходному сигналу 1 (рис. 2) увеличивается в 1,08 раза. При возрастании скорости роста трещины в 1,4 раза амплитуда выброса на заднем фронте сигнала АЭ по отношению к исходному сигналу возрастает в 1,22 раза. Наблюдается и уменьшение длительности формируемых сигналов АЭ. Так, возрастание скорости разрушения на конечном этапе развивающегося процесса в 1,1 раза приводит к уменьшению длительности сигнала АЭ в 1,07 раза. При возрастании скорости в 1,4 раза длительность сигнала АЭ уменьшается в 1,23 раза.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что причиной выбросов амплитуды



на заднем фронте сигналов АЭ является возрастающее скорости разрушения элементов КМ. Однако, как отмечено выше, задний фронт реальных сигналов АЭ является изрезанным. Относительно некоторой усредненной кривой изменения заднего фронта сигнала АЭ наблюдаются не только выбросы амплитуды, но и их падения (рис. 3).

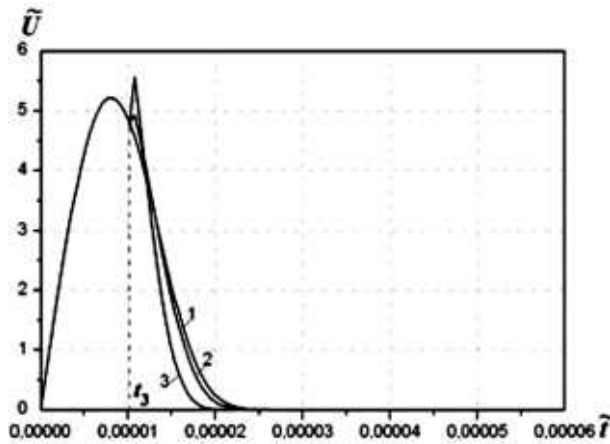


Рис. 2. Зависимости изменения сигналов АЭ во времени:

1 – при постоянной скорости разрушения элементов КМ –  $\alpha_T = \alpha = 10$ ;  
2, 3 – при начальной и возрастающей скорости разрушения элементов КМ на конечном этапе.

Скорость разрушения элементов КМ для сигналов 2 и 3:

$$2 - \alpha_T = \alpha + \alpha_1 = 11; \quad 3 - \alpha_T = \alpha + \alpha_1 = 14.$$

Время изменения скорости разрушения от начала развития процесса

$$\tilde{t}_3 \text{ равно: } \tilde{t}_3 = 0,000010733$$

Исходя из результатов полученных выше, такая изрезанность заднего фронта должна быть обусловлена переменной скоростью роста трещины на конечном этапе развития процесса разрушения. При этом, очевидно, что сценарий роста тре-

щины (сценарий изменения ее скорости) будет определять не только амплитудно-временные параметры, но и количество выбросов и падений амплитуды. Поэтому проведем моделирование сигналов АЭ, формируемых на конечном этапе разрушения КМ для различных сценариев протекания развивающегося процесса.

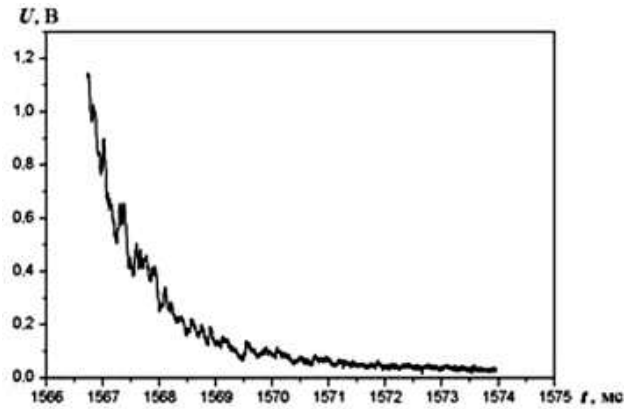


Рис. 3. Зависимость изменения амплитуды заднего фронта сигнала АЭ, зарегистрированного при разрушении образца из сплава ВК6 в виде таблетки с надрезом [11]. Скорость нагружения образца составляла 10 мм/мин

Результаты такого моделирования показаны на рис. 4 в виде зависимостей  $\tilde{U}(t) = U(t)/u_0$ , представленных в относительных единицах. При проведении расчетов параметры, которые входят в выражение (1), приведены к безразмерным величинам, а время представлено в нормированных единицах. Моделирование сигналов АЭ, показанных на рис. 4, а, б, проводили при условии, что на

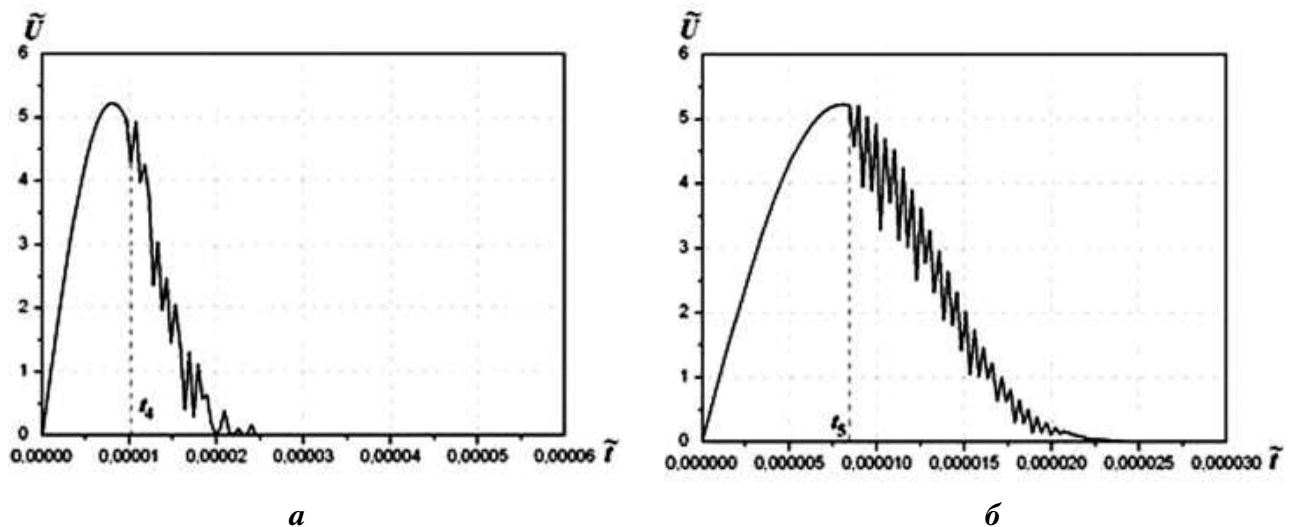


Рис. 4. Зависимости изменения сигналов АЭ во времени в зависимости от сценария изменения скорости роста трещины:

а – сценарий А, время начала изменения скорости  $\tilde{t}_4 = 0,000010221$ , шаг изменения скорости по времени  $\Delta\tilde{t}_4 = 0,0000005122$ ;

б – сценарий В, время начала изменения скорости  $\tilde{t}_5 = 0,000008688$ , шаг изменения скорости по времени  $\Delta\tilde{t}_5 = 0,0000002555$ .

Начальная скорость роста трещины  $\alpha_T = \alpha = 10$

начальном этапе скорость процесса разрушения была постоянной величиной, значение которой соответствовало скорости нагружения КМ —  $\alpha_T = \alpha = 10$ . Значения параметров  $v_0$  и  $r$  были приняты равными:  $v_0 = 100\,000$ ;  $r = 10\,000$ .

Однако, начиная с моментов времени  $\tilde{t}_4$  и  $\tilde{t}_5$ , происходило изменение скорости роста трещины. При этом использовались два различных сценария развития процесса разрушения — сценарий А (рис. 4, а) и сценарий В (рис. 4, б). Для сценария А (рис. 4, а) вариация скорости процесса разрушения от первоначальной скорости начиналось в момент времени  $\tilde{t}_4$ , равный  $\tilde{t}_4 = 0,000010221$ . При этом временной шаг очередного изменения скорости составлял  $\Delta\tilde{t}_4 = 0,0000005122$ . Для сценария В (рис. 4, б) вариация скорости процесса разрушения от первоначальной скорости начиналось в момент времени  $\tilde{t}_5$  равный  $\tilde{t}_5 = 0,000010221$ . При этом временной шаг очередного изменения скорости составлял  $\Delta\tilde{t}_5 = 0,0000002555$ . Сценарии строились на последовательном уменьшении и увеличении скорости разрушения на каждом шаге приращения времени. Однако величины уменьшения и увеличения скорости разрушения были различны. Для сценария А изменение скорости процесса разрушения  $\pm\alpha_i$  (где  $i$  — индекс шага изменения скорости) выбиралось в диапазоне значений от  $-1$  до  $6$  и задавалось случайным образом, но с выбранным шагом по времени. Для сценария В данное изменение скорости процесса разрушения выбиралось в диапазоне величин от  $-9,5$  до  $0,2$  и задавалось случайным образом, но с выбранным шагом по времени. В обоих случаях скорость изменялась практически до полного разрушения КМ.

Из рис. 4, а, б видно, что изменение скорости процесса разрушения, как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения приводит к появлению изрезанности заднего фронта формируемого сигнала АЭ. При этом величины выбросов и падений амплитуды определяются числовыми значениями изменения скорости развивающегося процесса. Полученные результаты так же показывают, что временной шаг по вариации скорости разрушения или количество изменений скорости на заданном временном интервале определяет степень изрезанности заднего фронта сигнала АЭ. Так для сигнала рис. 4, б временной шаг изменения скорости процесса разрушения меньше, чем для сигнала рис. 4, а, т.е.  $\Delta\tilde{t}_5 < \Delta\tilde{t}_4$ . При таком

условии степень изрезанности заднего фронта сигнала АЭ, показанного на рис. 4, б, больше, чем для сигнала АЭ, показанного на рис. 4, а. Под критерием степени изрезанности выбрано количество выбросов или падений амплитуды сигнала АЭ. Так при соотношении времен  $\Delta\tilde{t}_4 / \Delta\tilde{t}_5 = 2$  количество выбросов амплитуды на заднем фронте сигнала АЭ, показанного на рис. 4, б, в 2 раза больше, чем для сигнала АЭ, показанного на рис. 4, а.

Следует отметить, что результаты проведенного моделирования (рис. 4) имеют хорошее согласование с экспериментальными данными (рис. 3), полученными при проведении испытаний КМ.

### Выводы

Проведенные исследования показывают, что искажение формы сигналов АЭ, формируемых при разрушении КМ, обусловлено изменением скорости развивающегося процесса. Если процесс разрушения развивается с постоянной скорости, то сигнал АЭ является гладким, т.е. отсутствуют искажения его формы. В тоже время, возрастание скорости разрушения на начальном этапе приводит к искажению переднего фронта сигнала АЭ, которое наблюдается в виде возрастания его крутизны. При этом происходит увеличение максимальной амплитуды сигнала АЭ, а так же его сжатие во времени (уменьшение его длительности). Если скорость процесса разрушения возрастает на конечном этапе, то происходит искажение заднего фронта формируемого сигнала АЭ. На заднем фронте сигнала наблюдается выброс амплитуды. При этом так же происходит уменьшение длительности сигнала АЭ. Как показывают исследования, величина амплитуды выброса определяется величиной приращения скорости разрушения. Чем больше приращение скорости разрушения, тем большее значение имеет амплитуда выброса на заднем фронте сигнала АЭ. В тоже время, изрезанность заднего фронта сигнала АЭ, как показали результаты моделирования, обусловлена вариацией скорости процесса разрушения. Относительно некоторой усредненной кривой изменения заднего фронта сигнала АЭ, возрастание скорости разрушения приводит к появлению выброса амплитуды, а ее уменьшение — к падению амплитуды. При этом величины выбросов и падений амплитуды определяются числовыми значениями изменения скорости развивающегося процесса. Степень изрезанности заднего фронта сигнала АЭ, как показали исследования, определяется временным шагом по вариации скорости разрушения или количеством изменений скорости на заданном временном интервале. Чем меньше временной интервал между изменениями скорости, тем больше



изрезанность заднего фронта сигнала АЭ. Полученные данные согласуются с результатами экспериментальных исследований. В тоже время, интерес представляет исследование сигналов АЭ для неоднородных по структуре (многослойных) КМ, где разрушение отдельных слоев с различными физико-механическими характеристиками должно сопровождаться значительными вариациями скорости развивающегося процесса разрушения.

### Литература

1. *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.
2. *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.
3. *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.
4. *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.
5. *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.
6. *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.
7. *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.
8. *Shcherbakov R.* On modeling of geophysical problems / R. Shcherbakov // A dissertation for degree of doctor of philosophy (Cornell university). — 2002. — 209 p.
9. *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.
10. *Филоненко С. Ф.* Моделирование акустической эмиссии при разрушении композиционных материалов растяжением / С. Ф. Филоненко, Т. В. Нимченко, Т. Н. Косицкая // *Вісник інженерної академії України.* — 2010. — № 1. — С. 128–133.
11. *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.
12. *Косицька Т. М.* Моделювання сигналів акустичної емісії при механічному руйнуванні композиційного матеріалу / Т. М. Косицька // *Вісник Чернігівського Державного технологічного університету. Серія Технічні науки.* — № 45, 2010. — С. 214–220.
13. *Регель В. Р.* Кинетическая природа прочности твердых тел [В. Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский]. — М.: Наука, 1974. — 560 с.
14. *Маламедов И. М.* Физические основы надежности [И. М. Маламедов]. — Л.: Энергия, 1970. — 152 с.
15. *Финкель В. М.* Физика разрушения [В. М. Финкель]. — М.: Metallургия, 1970. — 376 с.
16. *Финкель В. М.* Физические основы торможения [В. М. Финкель]. — М.: Metallургия, 1977. — 360 с.
17. *Новиков Н. В.* Соппротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов [Н. В. Новиков, А. Л. Майстренко, В. Н. Кулаковский]. — К.: Наукова Думка, 1993. — 220 с.
18. *Филоненко С. Ф.* Методы и системы акустоэмиссионной диагностики: дис. доктора технических наук: 05.11.13 / Филоненко Сергей Федорович. — К., 2003. — 270 с.