

УДК 534.2

## Временные распределения импульсов акустической эмиссии при разрушении стеклотекстолита

*А.А. Лепендин, В.В. Поляков*

Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

## Temporal Distributions of Acoustic Emission Pulses During Fiberglass Fracture

*A.A. Lependin, V.V. Polyakov*

Altai State University (Barnaul, Russia)

Работа посвящена получению и анализу распределений временных интервалов между импульсами в сигнале акустической эмиссии при разрушении структурно-неоднородных материалов. Показана возможность предварительного разделения импульсов на группы с целью дальнейшего анализа их временных распределений как независимых друг от друга. Разработанный подход апробирован на стеклотекстолите марки СТЭФ, в котором процесс разрушения реализуется за счет небольшого числа конкурирующих механизмов — растрескивания связующего, отслоения волокон ткани от матрицы, разрыва волокон. Были выделены две группы импульсов — низкоамплитудные, которые связаны с ростом микротрещин, и высокоамплитудные — возникающие при росте макротрещин и разрывах волокон. Показано, что при деформировании материала характер временных распределений для выделенных групп существенно различается. Данный результат обуславливается специфическими особенностями коллективного поведения ансамблей источников акустической эмиссии различной природы при деформировании и разрушении стеклотекстолита.

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, разрушение, скейлинг, композиционный материал, стеклотекстолит.

DOI 10.14258/izvasu(2015)1.2-04

**Введение.** Исследование процессов разрушения в структурно-неоднородных материалах сталкивается со многими трудностями. Связано это в первую очередь с тем, что разрушение даже в случае конструкционных материалов представляет собой сложный, многоуровневый процесс, в котором задействованы помимо непосредственно роста трещин различные механизмы пластического деформирования. Если же фаз или компонентов в материале несколько, то наложение и взаимовлияние этих механизмов друг на друга приводит к сложной картине микро-, мезо- и макроскопического поведения.

In this study, the obtainment procedure and the analysis of temporal distributions of acoustic emission pulses during fracturing of structurally heterogeneous materials are considered. The possibility for pulses to be pre-separated into several groups and the pulses temporal distributions to be further analyzed independently is demonstrated. The proposed approach was evaluated on a fiberglass of STEF brand with its fracturing due to a small number of competing mechanisms – cracking of reinforcing material, delamination of fibers from the matrix, and fiber tear. Two groups of pulses were identified. A first group is a low-amplitude pulses related to spreading of microcracks, and a second group is a high-amplitude group related to spreading of macrocracks and tearing the reinforcing filaments. It is shown that during the deformation process, temporal distribution features for the identified groups are essentially different. This fact is caused by specific collective behavior features of ensembles of acoustic emission sources of different nature under deformation and fracturing of a fiberglass.

**Keywords:** acoustic emission, fracture, plastic scaling, composite epoxy material.

Одним из подходов к наблюдению за развитием процессов разрушения в конструкционных материалах является метод акустической эмиссии (АЭ). Механические колебания и акустическое излучение сопровождают в той или иной степени практически все процессы, связанные с перестройкой внутренней структуры материала. Однако применение метода АЭ к диагностике и исследованию структурно-неоднородных материалов в силу принципиальной многоуровневости процессов имеет ограниченный характер.

Развивается новый подход к анализу сигналов АЭ, регистрируемых при разрушении неоднородных

материалов. Он заключается в получении интервалов времени между импульсами АЭ различной природы и анализом эмпирических распределений данных интервалов.

**1. Построение распределений временных интервалов.** В работах [1, 2] было показано, что для некоторых классов материалов при механическом нагружении задействуется иерархия самоподобных дефектных структур, что приводит к тому, что масштабы дефектов подчиняются скейлинговым соотношениям вида  $n(d) \sim d^{-h}$ , где  $n(d)$  — число дефектов масштаба  $d$ , а  $h$  — параметр скейлинга. Аналогично распределение времен между приростами размеров дефектов из-за взаимной скоррелированности процессов деформирования и разрушения может подчиняться соотношениям вида

$$n(\Delta t) \sim \Delta t^{-\beta}$$

с другим параметром скейлинга  $\beta$ .

Однако выделение нескольких «фрактальных» процессов порождения актов АЭ и выделение их независимых вкладов в общий поток является крайне сложной задачей, требующей привлечения дополнительных предположений о структуре и характеристиках источников акустической эмиссии. Одной из возможностей представляется разделение импульсов на различные группы по независимому внешнему критерию и получение оценок параметров распределений временных интервалов для разделения этих групп.

Для выделения групп импульсов можно применить подход, связанный с построением амплитудных распределений акустической эмиссии [3]. Структура таких распределений, связанная с масштабами источников, представляет собой в случае структурно-неоднородных материалов набор нескольких ветвей с разными показателями скейлинга. Наиболее простым случаем является распределение, при котором импульсы разбиваются на две группы, лежащие в об-

ластях низких и высоких амплитуд (рис. 1). Как следует из рисунка 1, может использоваться простой пороговый критерий относительно некоторого значения  $u_T$ . Подобное разделение, согласно [4, 5], хорошо согласуется с физически разными типами источников АЭ сигнала и, соответственно, различными механизмами деформирования и разрушения. Для импульсов с амплитудами, ограниченными  $u_D < u < u_T$  где  $u_D$  представляет собой порог дискриминации при регистрации сигнала акустической эмиссии, вычисляются интервалы времени  $\Delta t_{low}^i$  между соседними импульсами с малой амплитудой. Для импульсов с амплитудой выше порога  $u_T < u$  рассчитываются интервалы времени  $\Delta t_{high}^i$  между соседними импульсами с большой амплитудой. В силу того, что импульсы разных групп генерируются в результате работы разных типов источников, смешанные интервалы времени между высоко- и низкоамплитудными импульсами не учитываются. На основе полученных таким образом рядов временных интервалов строятся отдельно зависимости  $n_{low}(\Delta t_{low}^i)$  и  $n_{high}(\Delta t_{high}^i)$ , характеризующиеся собственными показателями скейлинга

$$n_{low}(\Delta t_{low}^i) \sim (\Delta t_{low}^i)^{-\beta'}, \quad n_{high}(\Delta t_{high}^i) \sim (\Delta t_{high}^i)^{-\beta''}$$

Таким образом, может быть выявлена внутренняя структура плотности распределения, которая описывает действие нескольких процессов, одновременно генерирующих акты акустической эмиссии в неоднородном материале.

**2. Экспериментальные исследования стеклотекстолита.** Разработанная методика была применена для исследования распределений временных интервалов акустической эмиссии при разрушении стеклотекстолита марки СТЭФ. Данный материал состоит из двух компонентов — стеклотканевого армирующего каркаса и хрупкой полимерной матрицы. В силу особенностей своего строения он может использоваться как удобный модельный объект, в котором процесс разрушения реализуется за счет нескольких механиз-

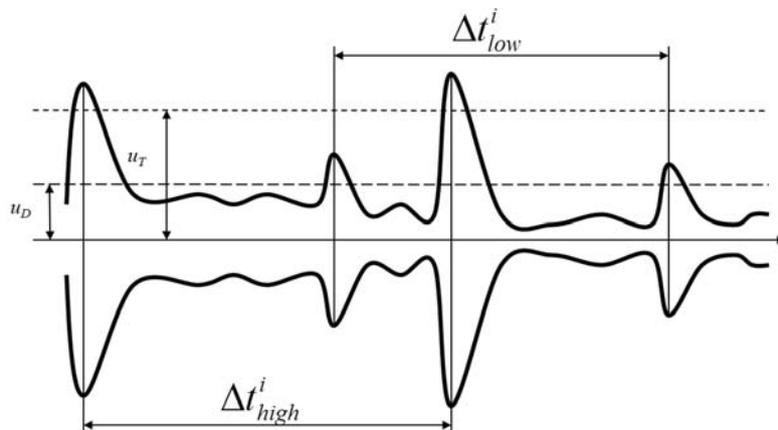


Рис. 1. Определение временных интервалов между импульсами АЭ

мов — растрескивания связующего, отслоения волокон ткани от матрицы и разрыва волокон.

При получении акустико-эмиссионных сигналов использовался программно-аппаратный комплекс, позволявший проводить механические испытания образцов на одноосное растяжение с постоянной скоростью нагружения и одновременной регистрацией сигнала акустической эмиссии, приложенной нагрузки и деформации образцов. После регистрации и предварительной обработки сигнала АЭ проводилось обнаружение актов акустической эмиссии при помощи модифицированного метода осцилляций [6, 7], учитывающего форму огибающей и позволяющего выделять отдельные импульсы в условиях их перекрытия. Образцы для испытаний были изготовлены из плоских листов стеклотекстолита толщиной 1 мм и имели размер рабочей области 2,5x12 мм. Микроструктура деформированного образца контролировалась с помощью оптической микроскопии.

Растяжение каждого из образцов проводилось до заранее заданной степени деформации в диапазоне деформаций от  $\varepsilon = 0,1$  до разрушения с одновре-

менной регистрацией сигнала акустической эмиссии. Согласно [8], малым деформациям до  $\varepsilon \sim 0,1$  соответствовали механизмы разрушения в виде растрескивания матрицы при сохранности нитей стекловолокна. На следующем этапе происходило постепенное слияние микротрещин вследствие роста их числа и размеров. При больших деформациях  $\varepsilon \sim 0,2$ , предшествовавших разрыву образца, образовывалась магистральная трещина в связующем и происходил разрыв армирующих стекловолокон.

### 3. Анализ экспериментальных результатов.

Согласно методике, описанной в разделе 1 настоящей статьи, были рассчитаны временные распределения акустической эмиссии для разных степеней деформации. Полученные результаты в виде типичных распределений числа интервалов импульсов  $n(\Delta t)$  приведены для четырех разных деформаций на рисунке 2. Как следует из рисунка 2, при малых деформациях временное распределение импульсов представляется одной ветвью, соответствующей низким амплитудам АЭ-сигналов (сплошные линии). При увеличении деформации наблюдается образование новой

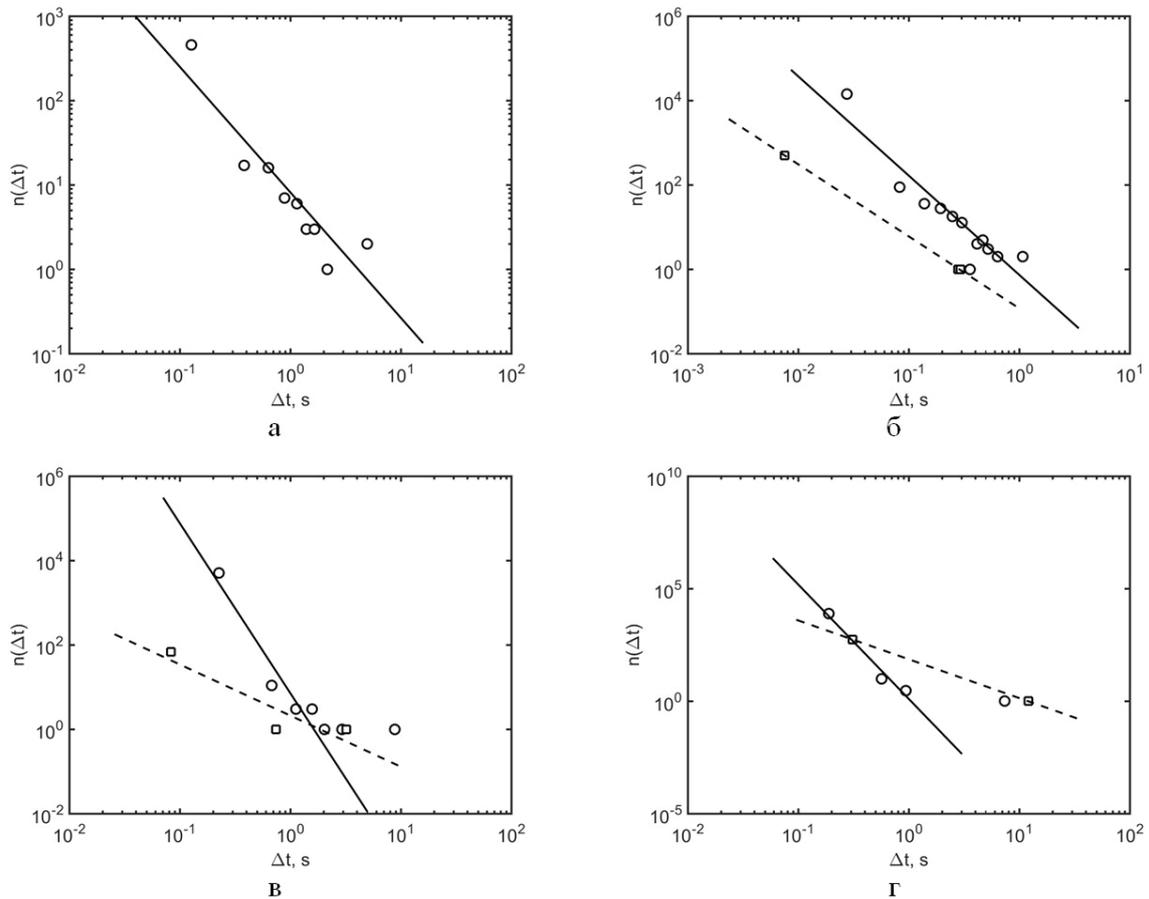


Рис. 2. Временные распределения АЭ при разрушении стеклотекстолита на разных стадиях деформирования (○ — низкоамплитудные импульсы; □ — высокоамплитудные импульсы): а —  $\varepsilon \sim 0,1$ ; б —  $\varepsilon \sim 0,12$ ; в —  $\varepsilon \sim 0,15$ ; г —  $\varepsilon \sim 0,2$

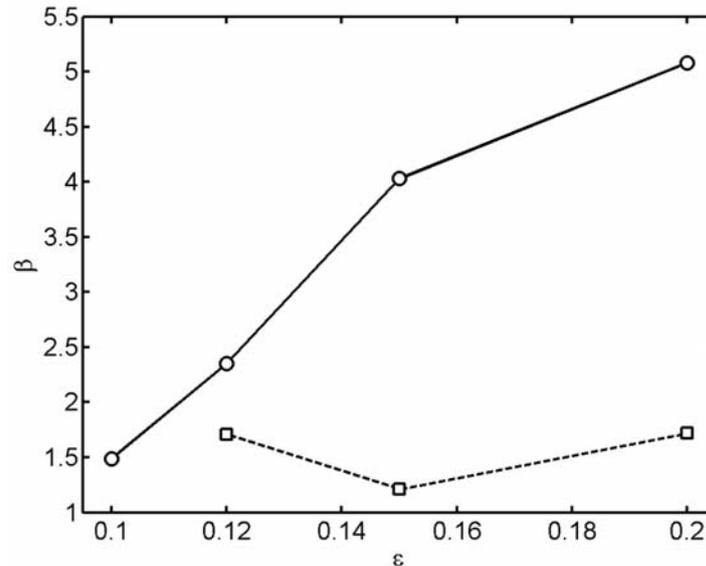


Рис. 3. Зависимость коэффициента скейлинга временных распределений импульсов АЭ низкой ( $\circ$ ) и высокой ( $\square$ ) амплитуды от деформации

ветви импульсов с высокими амплитудами, все более отходящими от основного распределения (пунктирные линии).

Для анализа полученных результатов рассчитанные показатели скейлинга  $\beta$  для низко- и высокоамплитудной ветвей временных распределений приведены на рисунке 3 в зависимости от степени деформации  $\varepsilon$ . Из рисунка 3 следует, что для низкоамплитудных импульсов показатель скейлинга (определяющий наклон ветви) при изменении деформации существенно увеличивается. Значения показателя  $\beta$  для высокоамплитудных импульсов характеризуются меньшими значениями, чем в случае низких амплитуд, и слабо зависят от деформации.

Увеличение показателя скейлинга временных распределений означает увеличение доли малых временных интервалов, т. е. рост числа актов акустической эмиссии в единицу времени. Поскольку низкоамплитудные импульсы генерируются за счет образования

и роста микротрещин, то полученная зависимость для показателя  $\beta$  может быть связана с быстрым увеличением количества микротрещин и числа их скачков при распространении. Малые значения показателя скейлинга для высокоамплитудной ветви отражают относительную редкость высокоамплитудных актов АЭ, генерируемых за счет новых источников — разрывов стекловолокон и развития магистральных трещин.

**Заключение.** Предложенный подход, основанный на получении временных распределений импульсов акустической эмиссии, был применен к анализу разрушения стеклотекстолита. Полученные результаты позволили выявить особенности механизмов акустического излучения при различных степенях деформации вплоть до разрушения. Это свидетельствует о перспективности применения временных распределений при исследовании акустической эмиссии в композиционных материалах.

### Библиографический список

1. Гиляров В.Л., Варкентин М.С., Корсуков В.Е., Корсукова М.М., Куксенко В.С. Формирование степенных распределений дефектов по размерам в процессе разрушения материалов // Физика твердого тела. — 2010. — Т. 52, Вып. 7.
2. Carpinteri A., Lacidogna G., Nicolini G., Puzzi S. Critical defect size distributions in concrete structures detected by the acoustic emission technique // Meccanica. — 2008. — №. 43.
3. Буйло С.И. Физико-механические и статистические аспекты повышения достоверности результатов акустико-эмиссионного контроля и диагностики. — Ростов н/Д, 2008.
4. Лепендин А.А., Поляков В.В. Скейлинг характеристик акустической эмиссии при пластической деформации и разрушении // Журнал технической физики. — 2014. — Т. 84, № 7.

5. Стоев П.И., Папиров И.И., Мощенок В.И. Акустическая эмиссия титана // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. — 2006. — Вып. 1.

6. Егоров А.В., Поляков В.В., Гумиров Е.А., Лепендин А.А. Регистрация сигналов акустической эмиссии с помощью модифицированного метода осцилляций // Приборы и техника эксперимента. — 2005. — Т. 48, № 5.

7. Егоров А.В., Лепендин А.А., Поляков В.В. Методы обработки экспериментальных данных при акустической и электромагнитной диагностике. — Барнаул, 2012.

8. Лепендин А.А., Поляков В.В., Салита Д.С. Эволюция статистических характеристик акустической эмиссии при разрушении стеклотекстолита // Письма в Журнал технической физики. — 2015. — Т. 41, № 9.