

## Накопленная акустическая эмиссия при разрушении пористого железа\*

*А.А. Лепендин, А.В. Егоров, В.В. Поляков*

Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

## Total Acoustic Emission of Porous Iron Under Fracture

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

Altai State University (Barnaul, Russia)

Работа посвящена развитию методики анализа сигналов акустической эмиссии (АЭ) при разрушении структурно-неоднородных материалов и конструкций из них. В качестве модельного материала использовалось пористое железо, спеченное из порошка марки ПЖРВ2. Этот тип материалов является типичным представителем материалов с резко неоднородной структурой, так как в нем присутствуют две «компоненты» — компактные участки и поровое пространство, существенно отличающиеся по своим характеристикам. Пористость образцов варьировалась в диапазоне 5–25%. Был предложен новый подход к классификации сигналов акустической эмиссии, заключающийся в разделении потока актов АЭ на группы, соответствующие различным участкам амплитудного распределения. Выделение этих групп соответствовало и физически разным механизмам деформирования и разрушения материала — пластической деформации компактного материала, росту и объединению трещин. Вклады в общий поток актов можно охарактеризовать кумулятивной акустической эмиссией, которая в данном случае описывает накопление повреждений, обусловленных различными источниками АЭ в материале.

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, разрушение, пластическая деформация, пористое железо.

DOI 10.14258/izvasu(2014)1.2-32

**Введение.** Развитие методов неразрушающего контроля структурно неоднородных материалов и конструкций из них является одним из приоритетных направлений исследования современной науки. Процессы пластической деформации и разрушения, как правило, сопровождаются диссипацией энергии по нескольким одновременно задействован-

This paper is devoted to development of analysis methods of acoustic emission (AE) signals during the destruction of structurally inhomogeneous materials. A porous iron sintered powder PZHRV2 is used as a model material. Materials of this type are typical materials with inhomogeneous structure. They contain two «components» with significant differences in their physical and mechanical characteristics. The first component consists of compact areas, and the second is a pore space. Porosity of the samples is between 5% and 25%. A new approach to classification of acoustic emission signals is proposed. The flow of AE acts is separated into groups in accordance with different parts of an amplitude distribution. Allocation of these groups corresponds to physically different mechanisms of deformation and fracture of materials — plastic deformation of the compact areas of material and growth of cracks. Allocated contributions to the total acoustic emission are estimated. They described the accumulation of damage caused by various sources of AE in the material.

**Key words:** acoustic emission, fracture, plastic deformation, porous iron.

ным каналам. Происходит как локальный нагрев областей, генерация электромагнитного излучения, так и возбуждение механических колебаний. Эти процессы зависят от особенностей локальной перестройки внутренней структуры материала и могут определяться множеством одновременно работающих физических механизмов. Выделение отдельных вкладов

\* Работа выполнена в рамках проекта, поддержанного Министерством образования и науки РФ (дог. № 02.//G//25.31.0063).

в общие наблюдаемые характеристики — достаточно сложная задача, требующая создания новых подходов как к предварительной обработке, так и анализу регистрируемых сигналов.

Метод акустической эмиссии (АЭ) основан на регистрации и анализе акустических сигналов, возникающих при перестройке структуры материала. Для изучения данного явления в структурнонеоднородных материалах и установления функциональных зависимостей между информативными параметрами АЭ и внутренними процессами в данной работе применялся подход, основанный на проведении серии механических испытаний на образцах из модельного материала. В качестве хороших объектов для исследования подходят пористые металлические материалы, так как они содержат две «фазы» с принципиально различающимися физико-механическими характеристиками — компактный материал и поры. Дополнительным преимуществом является то, что при росте пористости происходит перколяционный переход [1] — перестройка структуры порового пространства от закрытых пор к открытому поровому кластеру, сопровождающийся сменой доминирующего механизма генерации АЭ [2].

**1. Описание эксперимента.** При получении акустико-эмиссионных сигналов использовался программно-аппаратный комплекс, позволяющий проводить механические испытания образцов на одноосное растяжение с постоянной скоростью нагружения и одновременной регистрацией сигнала акустической эмиссии, приложенной нагрузки и деформации образцов. Рабочая полоса частот находилась в диапазоне от 100 до 800 кГц.

Исследования проводились на образцах, изготовленных из порошкового железа (порошок марки ПЖРВ2) путем однократного прессования порошков

в пресс-форме и последующего спекания в вакуумной печи при температуре 1450 К в течение 2,5 ч. Выбор данного пористого металла был обусловлен тем, что, с одной стороны, его свойства в компактном состоянии достаточно изучены, а с другой — он широко используется в промышленности. Изменение параметров структуры материала достигалось путем варьирования пористости  $P = 1 - \rho / \rho_k$ , где  $\rho$  и  $\rho_k$  — плотности пористого и компактного материалов соответственно. Погрешность измерения по пористости составляла  $\sim 1-2\%$ . Пористость  $P$  задавалась в интервале от  $P=5\%$  до  $P=25\%$ .

**2. Выделение вкладов отдельных типов импульсов.** После регистрации и предварительной обработки сигнала АЭ проводилось обнаружение актов акустической эмиссии при помощи модифицированного метода осцилляций [3], учитывающего форму огибающей и позволяющего выделять отдельные импульсы в условиях их перекрытия. Фиксировались амплитуда и время появления каждого импульса. На основе полученных таким образом данных строились амплитудные распределения для сигналов АЭ, которые в двойных логарифмических координатах имели характерный вид (рис. 1).

Таким образом, можно было выделить два типа импульсов с соответствующими им различными показателями скейлинга. Пороговое значение амплитуды не зависело от конкретного образца. В работе [4] было сделано предположение о том, что два участка на распределениях соответствуют разным механизмам, отвечающим за возникновение акустической эмиссии в материале. Низкоамплитудные импульсы характерны для процессов пластической деформации и микроразрушения в материале, а за высокоамплитудные отвечает рост крупных трещин и объединение их в кластеры с последующим

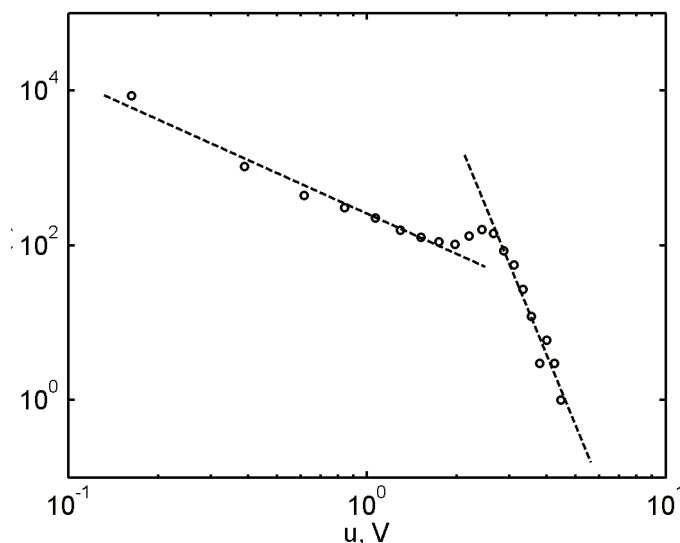


Рис. 1. Типичный вид амплитудного распределения импульсов АЭ (пористость образца  $P = 7\%$ )

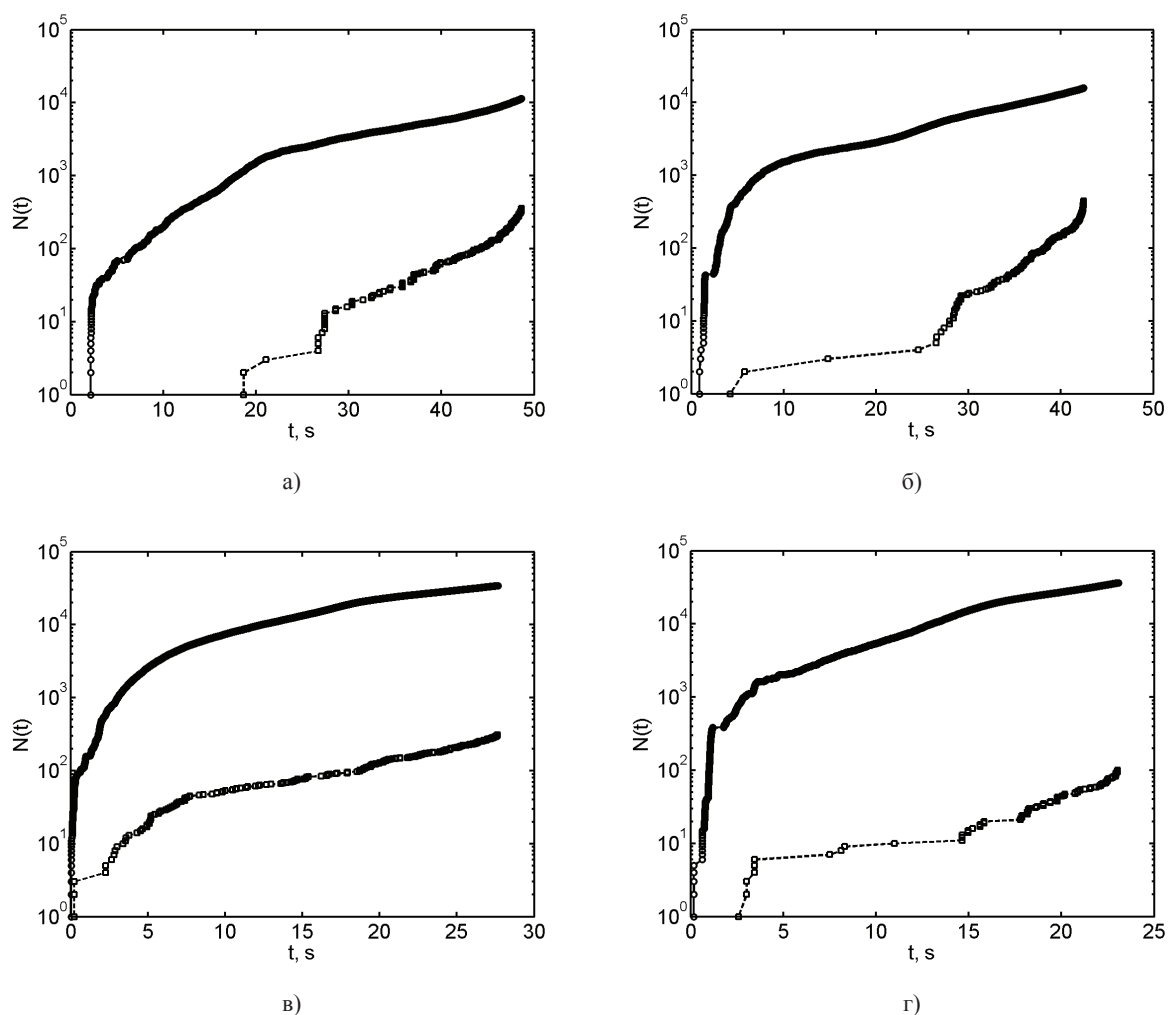


Рис. 2. Накопленная акустическая эмиссия пористого железа ( $\circ$  — низкоамплитудные импульсы;  $\square$  — высокоамплитудные импульсы): а)  $P = 7\%$ ; б)  $P = 10\%$ ; в)  $P = 17\%$ ; г)  $P = 25\%$

появлением сквозной трещины и разрушением материала. Косвенно эти соображения находят свое подтверждение в [5, 6], где выделены два типа акустической эмиссии — непрерывная, со слабовыделяемыми отдельными импульсами, и дискретная, связанная с ростом трещин.

Предположение о качественном отличии механизмов образования импульсов малых и больших амплитуд требовало дополнительного изучения. Для выделенных типов импульсов построены кривые накопленной акустической эмиссии, часть из которых представлена на рисунке 2.

**3. Анализ полученных результатов.** При малых пористостях (рис. 2а) появление высокоамплитудных импульсов происходило не с начала эксперимента. Таким образом, за генерацию акустической эмиссии вначале отвечал только один механизм, связанный с мелкомасштабными дефектами. Данное наблюдение

хорошо согласуется с тем, что в низкопористых материалах основной вклад в начале процесса нагружения должна давать пластическая деформация компактных участков. Включение второго механизма, связанного с ростом трещин, приводило к изменению скорости накопления дефектов первого вида — на зависимости первого вклада от времени виден перегиб вблизи момента появления первых высокоамплитудных импульсов.

Рост пористости до значений  $P \approx 10\text{--}11\%$ , соответствующих порогу перколяции для пористого железа, приводил к раннему включению второго механизма (рис. 2б). Однако существенным его влияние становилось на относительно поздних стадиях нагружения. При переходе через порог перколяции (рис. 2в) накопление импульсов обоих видов начиналось одновременно, но с различной скоростью с преобладанием низкоамплитудного вклада. В материале

происходил переход от преимущественной генерации АЭ при пластической деформации компактных участков материала к значительной роли крупных трещин от основных концентраторов напряжений, которыми выступали связанные в кластер открытые поры. Наличие подобного перехода находит свое подтверждение в [7], где проводилось моделирование процесса АЭ в пористых металлических материалах. Дальнейший рост пористости (рис. 2г) приводил к относительному увеличению вклада от пластической деформации при сравнительно редких событиях большой амплитуды, что можно связать с появлением не идентифицированных в данном подходе дополнительных механизмов, например зернограницного проскальзывания при вращении зерен материала.

Следует отметить, что вклады и первого, и второго типов характеризовались хорошо идентифицируемыми участками с постоянным наклоном в полулогарифмических координатах, что соответ-

ствовало зависимостям вида  $\log N(t) \approx t/\tau_0 + \log N_0$  или  $N(t) \sim \exp(t/\tau_0)$ . Можно провести аналогии с классической термофлуктуационной моделью Журкова, что в перспективе может потребовать отдельного исследования влияния температурных факторов на акустическую эмиссию в пористых металлах.

**Заключение.** Были построены и проанализированы амплитудные распределения акустико-эмиссионных сигналов и зависимости накопленной эмиссии от времени при разрушении пористого железа. Показано существование двух типов импульсов АЭ, соответствующих различным механизмам генерации акустико-эмиссионных импульсов с существенно различающимися характеристиками. Разработанный подход может быть применен как при изучении поведения АЭ характеристик материалов с неоднородным строением, так и при создании новых методов неразрушающего контроля на основе явления акустической эмиссии.

## Библиографический список

1. Шкловский Б.Н., Эфрос А.Л. Теория протекания и проводимость сильно неоднородных сред // Успехи физических наук. — 1975. — Т. 177, вып. 3.
2. Панин В.Е., Поляков В.В., Сыров Г.В., Фадеев А.В. Эволюция механизмов пластической деформации в пористых металлах // Известия вузов. Физика. — 1996. — № 1.
3. 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.
4. Лепендин А.А., Поляков В.В. Скейлинг характеристик акустической эмиссии при пластической деформации

и разрушении // Журнал технической физики. — 2014. — Т. 84, Вып. 7.

5. Гусев О.В. Акустическая эмиссия при деформации монокристаллов тугоплавких металлов. — М., 1982.

6. Стоев П.И., Папилов И.И., Мощенок В.И. Акустическая эмиссия титана // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. — 2006. — № 1.

7. Поляков В.В., Егоров А.В., Лепендин А.А. Моделирование пластической деформации и разрушения пористых материалов // Письма в ЖТФ. — 2005. — Т. 31, вып. 4.