

Скейлинг характеристик акустической эмиссии при пластической деформации и разрушении

© А.А. Лепендин, В.В. Поляков

Алтайский государственный университет,
656049 Барнаул, Россия
e-mail: pvv@asu.ru

(Поступило в Редакцию 29 ноября 2013 г.)

Обнаружен скейлинг амплитудных и временных распределений импульсов акустической эмиссии, отражающий самоподобие соответствующих дефектных структур. На примере пористых материалов показана возможность выделения независимых вкладов в поток актов акустической эмиссии, имеющих существенно различные показатели скейлинга. Наблюдаемые отличия этих показателей связаны с особенностями развития процессов пластической деформации и разрушения материала. Развитый подход к анализу процесса акустической эмиссии дает возможность описывать ее доминирующие механизмы при деформировании.

Введение

При процессах пластической деформации и разрушения [1,2] в материале формируется иерархия самоподобных дефектных структур. Масштабная инвариантность этих процессов проявляется в том, что дефекты структуры подчиняются скейлинговым соотношениям вида

$$n(d) \propto d^{-h}, \quad (1)$$

где $n(d)$ — число дефектов масштаба d , h — параметр скейлинга. Показатель степенного распределения h зависит от физической природы процесса и вида дефектов.

Динамическая локальная перестройка внутренней структуры [3] при формировании ансамблей дефектов может сопровождаться акустической эмиссией. Характеристики акустического излучения зависят от типов источников (дефектов различной природы) и действующих физических механизмов излучения (движения дислокационных ансамблей, скачков микротрещин и т.д.). Масштабная инвариантность деформационных процессов приводит к масштабной инвариантности ансамблей источников акустического излучения и соответствующим скейлинговым зависимостям для характеристик процесса акустической эмиссии.

В структурно-неоднородных материалах присутствуют различные конкурирующие механизмы генерации акустического излучения, вследствие этого регистрируемые акустико-эмиссионные сигналы представляют собой комбинацию вкладов от нескольких типов источников. Выявление параметров скейлинга позволит выделить и сопоставить вклады от доминирующих механизмов и источников акустического излучения, описать эволюцию соответствующих процессов при пластической деформации и разрушении. В настоящей работе проведено экспериментальное исследование масштабной инвариантности акустической эмиссии, возникающей в условиях механического нагружения структурно-неоднородных материалов.

Экспериментальный метод и материалы

При анализе акустико-эмиссионного излучения принципиальную роль играет выбор характеристик, наиболее адекватно отражающих информацию о процессах перестройки структуры и накоплении повреждений в материале. В качестве таких характеристик использовались параметры двух распределений потоков актов акустической эмиссии — распределение амплитуд импульсов и распределение временных интервалов между импульсами.

Построение амплитудных и временных распределений акустико-эмиссионных сигналов требует преодоления ряда трудностей. Основной проблемой при обработке регистрируемых сигналов является выделение единичного импульса в условиях частичного перекрытия и наличия многократных переотражений исходного сигнала от границ раздела в системе „образец-датчик“. Традиционный подход, основанный на применении пуассоновской модели для распределения потока актов акустической эмиссии во времени [3,4], может считаться достаточно обоснованным только в частном случае однородного материала с одним видом источников излучения, действующих статистически независимо.

В настоящей работе для определения характеристик акустической эмиссии использовался модифицированный метод детектирования [5]. Для измерений использовались широкополосные резонансные датчики с повышенной чувствительностью, обеспечивающие максимально возможные значения отношения сигнал/шум. Зарегистрированные сигналы на их выходе имели вид волновых пакетов (вспышек) с затухающей экспоненциально амплитудой колебаний и циклической частотой заполнения, определяемой резонансными свойствами датчика акустической эмиссии. Выделение отдельных импульсов производилось в широком диапазоне частот 100–800 kHz, охватывавшем область наиболее сильного изменения частотных спектров в процессе нагружения [6]. Последовательность получения распределенных сигналов акустической эмиссии включала в себя

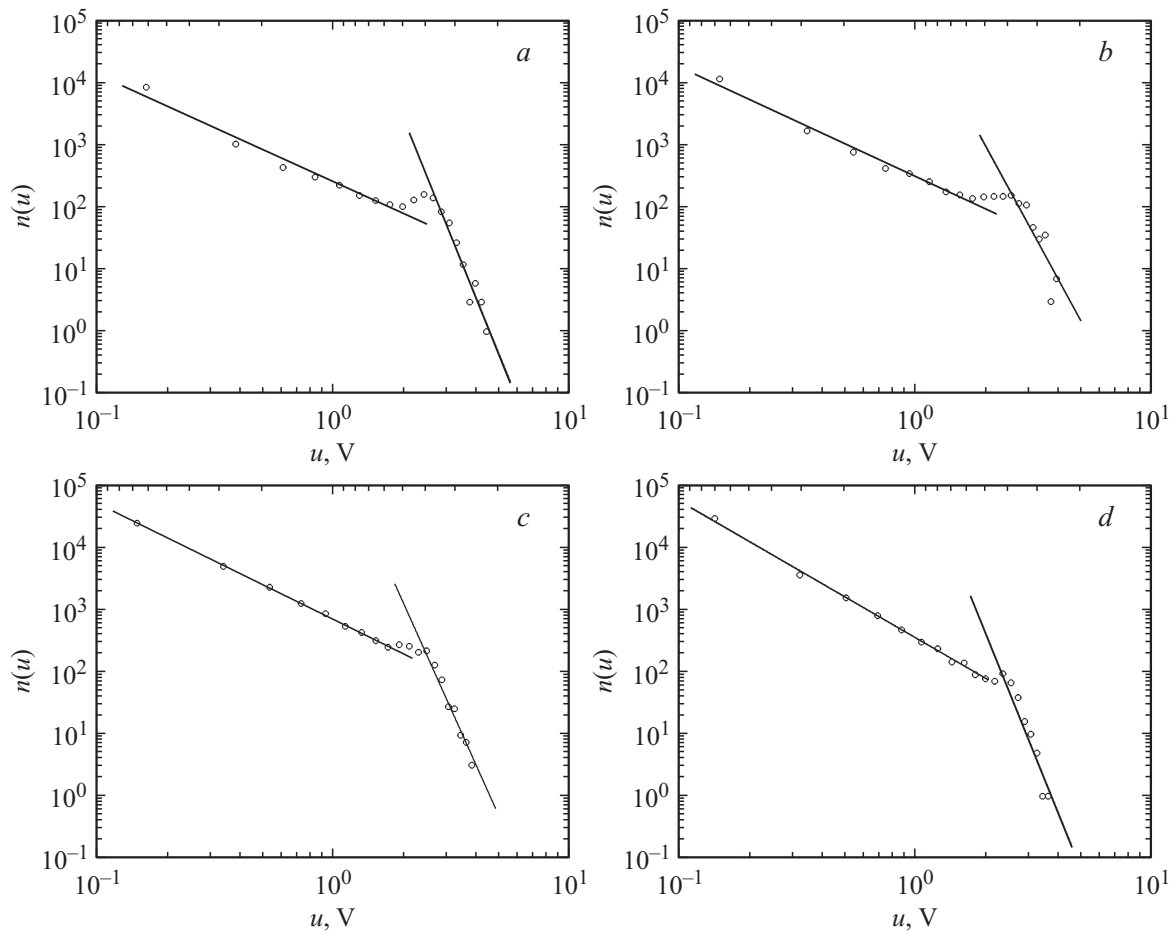


Рис. 1. Плотность распределения амплитуд импульсов акустической эмиссии в пористом железе, $P, \%$: a — 7, b — 10, c — 17, d — 25.

несколько этапов [5]. Вначале осуществлялась предварительная частотная фильтрация сигнала. При превышении амплитудой регистрируемого электрического сигнала заданного порога дискриминации u_D проводилась фиксация уровня амплитуды u и времени появления импульса t . Последующие импульсы определялись по превышению значением напряжения порога дискриминации. Акустическая эмиссия измерялась при статических испытаниях на одноосное растяжение с постоянной скоростью деформации с измерением удлинения и силы („жесткая“ схема нагружения).

Экспериментальные исследования проводились для материала с максимально неоднородной структурой, в качестве которого было выбрано пористое железо. Степень пористости (объемная доля пустот) P изменялась в широком интервале от 7 до 25%, ее величина определяла топологию структуры порового пространства. При значениях пористости, близких к порогу перколяции ($P \approx 10\%$), происходил геометрический фазовый переход [7,8], заключающийся в перестройке структуры, состоявшей из изолированных пор, в связный поровый кластер. Топологические изменения структуры сопровождались качественным изменением доминирующих механизмов пластической деформации и разрушения [9]. Именно при пористостях ниже порога перко-

ляции основным механизмом, определявшим деформационное поведение материала, являлась пластическая деформация компактных участков пористого тела [10]. При высоких пористостях уже на ранних стадиях деформационного упрочнения начиналось формирование микротрещин [9,10]. Это было связано с тем, что поры выступали в качестве мощных концентраторов упругих напряжений, релаксация которых осуществлялась за счет интенсивного трещинообразования в условиях малой пластической деформации.

Образцы для измерений изготавливались из железного порошка марки ПЖРВ2 путем прессования в пресс-форме и последующего спекания в вакууме при температуре 1450 К в течение 2.5 h. Параметры структуры материала контролировались методами оптической металлографии. Изготовленные образцы имели стандартную форму для испытаний на статическое растяжение с прямоугольной рабочей областью сечением 3×3 mm.

Амплитудные и временные распределения

Измерявшиеся плотности распределения амплитуд $n(u)$ определялись по уровням амплитуд u импульсов

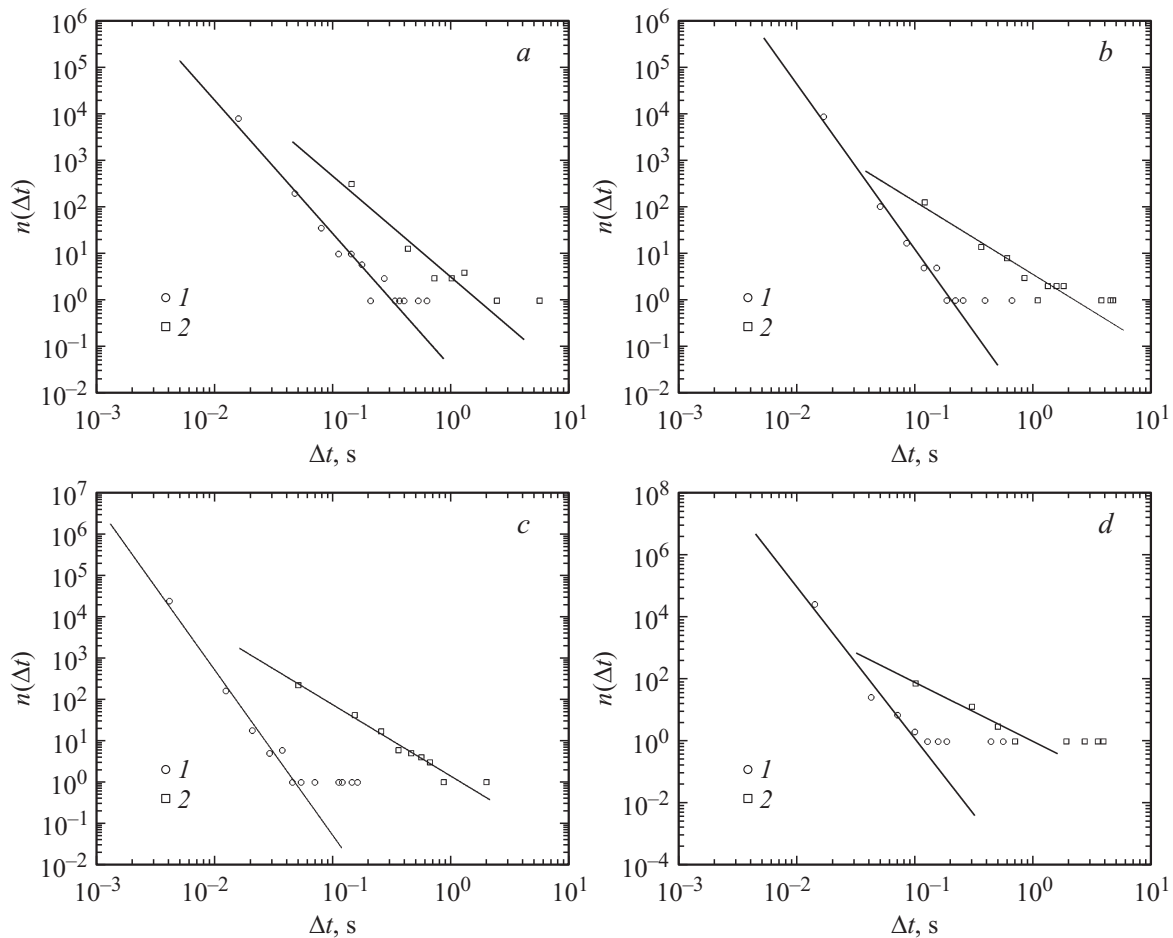


Рис. 2. Плотность распределения интервалов времени между соседними импульсами в пористом железе (1 — низкоамплитудные, 2 — высокоамплитудные): $P, \%$: $a - 7$, $b - 10$, $c - 17$, $d - 25$.

акустической эмиссии, регистрировавшимся в течение всего процесса нагружения вплоть до разрушения образца. Типичные результаты приведены на рис. 1 в двойных логарифмических координатах на примере пористостей $P = 7$ (a), 10 (b), 17 (c), 25 (d). Из рис. 1 следует, что все распределения $n(u)$ могут быть аппроксимированы двумя линейными участками с разными наклонами, соответствующими областям низких и высоких амплитуд. Каждый из участков описывался скейлинговым соотношением

$$n(u) \propto u^{-\alpha} \quad (2)$$

с различными значениями параметра скейлинга α .

Анализ рис. 1 позволил установить пороговую амплитуду u_{th} , разделяющую низко- и высокоамплитудные диапазоны импульсов. Значение этой величины для всех значений пористости составляло $u_T = 2.2 \pm 0.2$ V. Отметим, что ранее аналогичное разделение импульсов акустической эмиссии по нескольким группам с различными амплитудами было проведено при анализе деформационного поведения технического титана [11].

Выделение отдельных импульсов при построении распределений $n(\Delta t)$ промежутков времени Δt между соседними импульсами проводилось с помощью процедуры, аналогичной построению амплитудных распределений.

Однако анализ временных характеристик существенно осложнялся необходимостью в разделении самоподобных процессов порождения актов акустической эмиссии и выделения независимых вкладов отдельных процессов в общий поток актов. Для разделения вкладов был разработан подход к построению плотностей распределений $n(\Delta t)$, исходивший из описания общего потока актов акустической эмиссии как смеси двух одновременно протекавших разномасштабных процессов. В соответствии с этим расчет полной плотности распределения по всем интервалам времени заменялся построением двух различных зависимостей $n(\Delta t)$. Первая из них описывала временные характеристики процесса, характеризовавшегося низкими амплитудами импульсов. В этом распределении участвовали импульсы акустической эмиссии, не превосходившие по амплитуде пороговое значение u_T , разделявшее вклады источников разного типа: $u_D < u < u_T$. Вторая зависимость описывала оставшиеся высокоамплитудные импульсы с амплитудами $u > u_T$. Интервалы времени между импульсами разных групп при расчете во внимание не принимались.

Полученные результаты представлены на рис. 2 в двойных логарифмических координатах на примере значений пористостей $P = 7$ (a), 10 (b), 17 (c), 25% (d). Как видно из рис. 2, рассчитанные плотности распределений

имеют выраженный степенной характер и могут быть описаны скейлинговыми соотношениями вида

$$n(\Delta t) \propto \Delta t^{-\beta} \quad (3)$$

с разными значениями параметров скейлинга β для низко- и высокоамплитудных распределений.

Анализ скейлинга амплитудных и временных распределений

Для интерпретации результатов по амплитудным распределениям, представленным на рис. 1, необходимо учесть, что низко- и высокоамплитудным сигналам, как правило, соответствуют различные механизмы акустического излучения [12,13]. В случае пористых металлических материалов вклады в поток актов акустической эмиссии вносят два основных механизма — движение дислокаций, обеспечивающее пластическую деформацию компактных областей пористого тела, и развитие возле пор как концентраторов упругих напряжений системы микротрещин. Для этих механизмов характерно разделение источников, генерирующих акустико-эмиссионное излучение, по масштабам. Именно первый механизм действует на малых масштабах, соответствующих движению дислокационных ансамблей, второму отвечает больший масштаб, связанный с характерными размерами поровой и субзеренной структур.

Амплитуда излученных механических волн, генерируемых при деформировании материала, пропорциональна размеру источника акустической эмиссии. Распространение колебаний и их преобразование в регистрирующем тракте измерительной установки вносят искажения в форму сигналов, но качественно указанную связь не изменяют. Это означает, что низкоамплитудные импульсы можно связать с процессами пластической деформации, развивавшейся в компактных областях пористого материала, а высокоамплитудные — с возникновением и развитием микротрещин. Данный вывод был подтвержден непосредственным экспериментальным анализом. При нагружении малопористого материала в области пластического течения фиксировались только низкоамплитудные импульсы, высокоамплитудные сигналы обнаруживались лишь на стадии трещинообразования. Таким образом, наблюдавшееся разделение регистрируемых импульсов на группы с разными показателями скейлинга было обусловлено одновременным действием конкурирующих физических механизмов, определявших деформационное поведение материала.

Полученные скейлинговые зависимости (2), описывавшие плотности распределения амплитуд импульсов, были использованы для расчета показателей скейлинга α для образцов пористого железа. В случае низкоамплитудных импульсов значения этих показателей составляли $\alpha = 2.0 \pm 0.1$ и практически не зависели от пористости. Это означало, что характеристики потока актов акустической эмиссии, обусловленной процессами

пластической деформации в компактном каркасе пористого материала, практически не зависели от топологии порового пространства. В случае высокоамплитудных импульсов значения показателей α были выше и для образцов с разными пористостями изменялись в широком интервале от $\alpha = 3.5$ до 7.5. Такой разброс значений α отражал существенные различия в трещинной субструктуре (морфологии и размерах микротрещин) в материалах с разными пористостями [14].

В случае временных распределений показатели скейлинга β рассчитывались с помощью зависимостей (3). Для низкоамплитудных импульсов значения β находились в интервале $\beta = 2.8-4.8$, высокоамплитудные распределения описывались меньшими значениями параметров значений $\beta = 1.7-2.8$.

Для интерпретации этих результатов нужно учесть, что показатели скейлинга для распределения временных интервалов между соседними импульсами характеризуют степень согласованности действия источников акустического излучения. Именно если они имеют малую величину (малый наклон прямых на рис. 2), то равновероятно возможны различные интервалы времени для срабатывания источников, и источники действуют рассогласованно. При больших значениях β (большой наклон соответствующих прямых), напротив, большая часть интервалов времени имеет близкие значения, т.е. источники акустической эмиссии срабатывают почти синхронно. Таким образом, относительно высокие показатели скейлинга для низкоамплитудных сигналов означают синхронность (относительную согласованность) действия источников, инициируемых пластической деформацией компактных областей пористого материала. Более низкие значения показателей скейлинга для высокоамплитудных импульсов означают отсутствие согласованности в срабатывании источников излучения при образовании микротрещин и формировании трещинной субструктуры.

Заключение

Полученные результаты показывают, что развитый подход к анализу процесса акустической эмиссии в структурно-неоднородных материалах может использоваться для выявления доминирующих механизмов акустического излучения. Выявление скейлинговых зависимостей, описывающих отдельные вклады в поток актов акустической эмиссии, позволяет расширить возможности акустико-эмиссионного метода при диагностике деформационного поведения материалов.

Список литературы

- [1] Ботвина Л.Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. М.: Наука, 2008. 334 с.
- [2] Грешиников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. М.: Изд-во стандартов, 1976. 272 с.
- [3] Буйло С.И. // Дефектоскопия. 1995. Вып. 7. С. 13–26.

- [4] Буйло С.И. Физико-механические и статистические аспекты повышения достоверности результатов акустико-эмиссионного контроля и диагностики. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2008. 192 с.
- [5] Егоров А.В., Поляков В.В., Гумиров Е.А., Лепендин А.А. // Приборы и техника эксперимента. 2005. Т. 48. Вып. 5. С. 115–118.
- [6] Лепендин А.А., Поляков В.В., Матвеев С.И. // Изв. Алтайского гос. ун-та. 2009. Вып. 1. С. 124–128.
- [7] Шкловский Б.Н., Эфрос А.Л. // УФН. 1975. Т. 177. Вып. 3. С. 401–435.
- [8] Снарский А.А., Безсуднов И.В., Севрюков В.А. Процессы переноса в макроскопически неупорядоченных средах. М.: УРСС, 2007. 304 с.
- [9] Поляков В.В., Егоров А.В., Лепендин А.А. // Завод. лаб. Диагност. матер. 2004. Т. 70. Вып. 8. С. 31–34.
- [10] Поляков В.В., Егоров А.В., Лепендин А.А. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 4. С. 17–22.
- [11] Стоев П.И., Папиров И.И., Мощенок В.И. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. 2006. Вып. 1. С. 15–22.
- [12] Ильина С.Г., Забильский В.В., Мерсон Д.Л. // ФММ. 1997. Т. 83. Вып. 5. С. 143–151.
- [13] Гусев О.В. Акустическая эмиссия при деформации монокристаллов тугоплавких металлов. М.: Наука, 1982. 108 с.
- [14] Панин В.Е., Поляков В.В., Сыров Г.В., Фадеев А.В. // Известия вузов. Физика. 1996. Вып. 1. С. 101–105.