

*А.А. Лепендин, В.В. Поляков***Исследование характеристик акустико-эмиссионных сигналов при разрушении пористого железа**

**Введение.** Процессы пластической деформации и разрушения материалов сопровождаются излучением механических колебаний. Характеристики этих колебаний зависят от особенностей локальной перестройки внутренней структуры материала. Метод акустической эмиссии основан на регистрации и анализе данных акустических сигналов. Для эффективного использования этого метода при исследовании физико-механических характеристик конструкционных материалов необходимо установление функциональных зависимостей между информативными параметрами акустической эмиссии и внутренними физическими процессами в деформируемой среде. Следует учитывать тот факт, что в условиях механического нагружения акустическое излучение может генерироваться за счет многих существенно различающихся механизмов (пластической деформации на различных стадиях, хрупком и вязком разрушении, различных фазовых превращениях), что крайне затрудняет анализ и интерпретацию информативных параметров акустической эмиссии. Взаимосвязи механизмов и параметров акустико-эмиссионных сигналов в случае структурно-неоднородных материалов еще более сложны в силу того, что на акустическую эмиссию влияют геометрические и топологические параметры компонент, из которых состоит материал. Наибольший интерес при изучении характеристик акустико-эмиссионных сигналов представляют пористые металлические материалы, отличающиеся резко неоднородной структурой и, по сути, представляющие смеси двух «компонент»: пор и компактных металлических участков. Изменение концентрации пор – пористости материала – приводит к качественным перестройкам топологии порового кластера – перколяционным переходам, что не может не сказываться и на характеристиках акустико-эмиссионного излучения.

**Описание эксперимента.** Для получения акустико-эмиссионных сигналов использовался программно-аппаратный комплекс, позволяющий проводить механические испытания образцов на одноосное растяжение или сжатие с одновременной регистрацией сигнала акустической эмиссии. Рабочая полоса частот находилась в диапазоне от 100 до 800 кГц. Выбранный диапазон частот является оптимальным для построения аппаратуры, позволяющей исследовать как процессы разрушения, так и процессы пластической деформации материалов [1]. Шаг дискретизации для сигнала акустической эмиссии составлял

$T_0 = 0,625$  мкс. Созданное программное обеспечение позволило проводить предварительную обработку сигналов, получать основные информативные параметры (мощность, скорость счета, активность), а также проводить частотный анализ зарегистрированного сигнала акустической эмиссии по алгоритму быстрого преобразования Фурье.

Исследования проводились на образцах, изготовленных из порошкового железа (порошок марки ПЖРВ2). Выбор данного 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

$$P = 1 - \frac{\rho}{\rho_k},$$

где  $\rho$  и  $\rho_k$  – плотности пористого и компактного материалов соответственно.

Погрешность измерения по пористости составляла ~1–2%. Пористость  $P$  задавалась в интервале от  $P = 5\%$  до  $P = 25\%$  путем однократного прессования порошков в пресс-форме и последующего спекания в вакуумной печи при температуре 1450 К в течение 2,5 часов. Согласно положениям теории перколяции [2], в данный интервал пористостей попадали образцы с различной топологией порового пространства – от уединенных пор при малых пористостях, через перколяционный порог на  $P \approx 10 \div 11\%$  к связанному кластеру пор при больших значениях пористости.

**Фурье-спектры акустической эмиссии для пористого железа.** Полученные в результате экспериментов акустико-эмиссионные сигналы подвергались дальнейшей обработке. Был проведен частотный анализ зарегистрированных акустико-эмиссионных сигналов при деформации пористого железа. Ранее в [3] проводился анализ отдельных импульсов, что позволило выделить три типа характерных сигналов: непрерывную эмиссию, высокочастотную и низкочастотную вспышки. Частота заполнения высокочастотной вспышки составила 600 кГц и практически не зависела от пористости. В работах [3, 4] проводилось выделение отдельных акустико-эмиссионных импульсов с дальнейшим их разделением и классификацией на отдельные группы. Но, помимо этого, интерес представляет построение временных разверток для спектральных характеристик, позволяющих



ветствует переключение между двумя доминирующими для пористых материалов механизмами разрушения – пластическим и хрупким. При пористостях ниже порога перколяции основным механизмом, определяющим поведение материала и характеристики акустико-эмиссионного сигнала, являлось пластическое деформирование компактных участков пористого тела [5]. Для высокочастотного участка сигнала при малых пористостях (рис. 1а, б) величина  $U$  увеличивалась с ростом  $\sigma$  и достигала своего максимального значения на стадии разрушения. При этом наблюдался неявно выраженный пик в области напряжений, соответствующих пределу текучести, характерный для компактного железа [5].

Влияние роста трещин лишь постепенно нарастало вплоть до  $P_0 \approx 10\div 11\%$ . Оно постепенно становилось доминирующим при высоких значениях  $P$ . Указанный пик практически исчез (рис. 1в) и зависимость  $U(\sigma)$  приняла вид, характерный для хрупкого разрушения с интенсивным трещинообразованием. Это было обусловлено тем, что поры выступали в качестве мощных концентраторов упругих напряжений, релаксация которых осуществлялась за счет развития трещин на ранних стадиях деформирования.

Дальнейшее увеличение пористости (рис. 1г) приводило к постепенному росту связанного порового кластера, в котором наблюдался меньший уровень упругих напряжений. Это приводило к снижению амплитуды сигналов. Одновременно конкурирующий процесс развития магистральных трещин, происходящий при малой пластической деформации внутризеренных областей, приводил к увеличению величины  $U$  (рис. 1д).

Изменения спектральных характеристик могли быть связаны со сменой доминирующих источников акустического излучения. Именно при малых пористостях основным источником акустической эмиссии являлся, как и в компактных металлах, выход дислокаций на поверхность. Отметим, что в случае пористого материала к внешней поверхности образца добавляется поверхность порового пространства, что приводит к росту мощности сигналов акустической эмиссии. В области порога перколяции ( $P \sim 10\%$ ) вклад в акустическую эмиссию давали несколько различных видов источников, в частности, распространяющиеся от пор микротрещины. При высоких пористостях доминирующим источником акустической эмиссии являлись скачки ограниченного числа магистральных трещин. Таким образом, топологические изменения в структуре материала отражались в качественно меняющемся виде спектральных характеристик акустико-эмиссионного сигнала.

**Амплитудные распределения акустико-эмиссионных сигналов.** Спектральный анализ позволил выделить существенный для рассмотрения диапазон частот, где наблюдалось наиболее сильное

изменение характерного вида частотных спектров. Это диапазон, соответствующий высоким частотам – от 400 до 800 кГц. По всей видимости, данная полоса частот подвергалась наибольшим трансформациям при смене доминирующих механизмов деформирования и разрушения материала. В этой области частот проводилось построение амплитудных распределений для акустико-эмиссионных сигналов, развернутых, аналогично частотным спектрам, описанным ранее, во времени.

Основной проблемой при получении амплитудных распределений является выделение единичного импульса акустической эмиссии в случае их частичного перекрытия, а также наличие многократных переотражений исходного сигнала от многочисленных границ раздела в системе «образец–датчик». Каждому коллективному акту повреждения материала (срыв лавины дислокаций; слияние микротрещин между собой, с макротрещиной и т.д.) соответствует первичный упругий импульс. Однако регистрируемые импульсы на выходе датчика акустической эмиссии имеют вид радиоимпульсов с затухающей по экспоненте амплитудой колебаний. В случае подсчета осцилляции одному акту акустической эмиссии соответствует несколько импульсов. Их число определяется амплитудой входного сигнала, уровнем дискриминации, резонансными свойствами приемного датчика и т.п., что является недостатком данного метода. В методе детектирования перед дискриминатором вводят дополнительное устройство, которое выделяет огибающую сигналов акустической эмиссии. Однако в этом случае интенсивность потока определяется с большой погрешностью, так как близко расположенные импульсы перекрываются и регистрируются как один.

Для получения амплитудных распределений акустико-эмиссионных импульсов при разрушении пористых материалов использовался метод детектирования. Перед выделением отдельных импульсов проводилась предварительная фильтрация по диапазону частот 400–800 кГц. Результаты в виде зависимостей числа импульсов от механического напряжения и величины амплитуды приведены на рисунке 2.

В районе предела текучести вид распределений фактически не менялся, но, с другой стороны, изменение геометрии структуры материала, связанное с изменением пористости, оказывало более выраженное влияние на поведение амплитудных распределений. Низко- и высокоамплитудным сигналам, как правило, соответствуют различные механизмы деформирования и разрушения материала [6, 7], что давало возможность физической интерпретации вида полученных распределений.

Для образцов с малой пористостью, как видно из рисунка 2а, б, распределения амплитуд информировали о работе как хрупких трещин (из-за относительно высокого количества высокоамплитудных сигналов),



шие акустико-эмиссионные параметры. Это – пластическая деформация компактной части материала и рост хрупких трещин. Был предложен возможный подход к определению того, какой из двух механизмов преобладает в процессе деформирования материала. Строилось амплитудное распределение сигналов акустической эмиссии на достаточно протяженном промежутке времени. На полученном амплитудном распределении выделялась точка первого локального минимума  $U_l$  (возможна аппроксимация кривой, тогда точка определяется из пересечения кривой с осью абсцисс, принципиального отличия в качественном поведении результатов не наблюдалось). Сигналы с амплитудой меньшей  $U < U_l$  считались низкоамплитудными, с большей  $U > U_l$  – высокоамплитудными.

Подсчитывалось количество низко- и высокоамплитудных сигналов  $N_{low}$  и  $N_{high}$ . Отношение  $n = N_{high}/N_{low}$  определяло доминирующий в данном случае механизм: хрупкое разрушение материала в случае  $n > 0,5$ , когда количество высокоамплитудных импульсов достаточно велико или даже сравнимо с числом низкоамплитудных, говорит об активном процессе роста крупных трещин; пластической деформации компактных участков пористого материала при малых  $n < 0,5$ , когда основная масса импульсов является низкоамплитудной.

На рисунке 3 приведен пример расчета подобных отношений при разрушении материалов с различными пористостями. Видно, что рост пористости приводил к постепенному увеличению количества высокоамплитудных сигналов от растущих трещин, вплоть

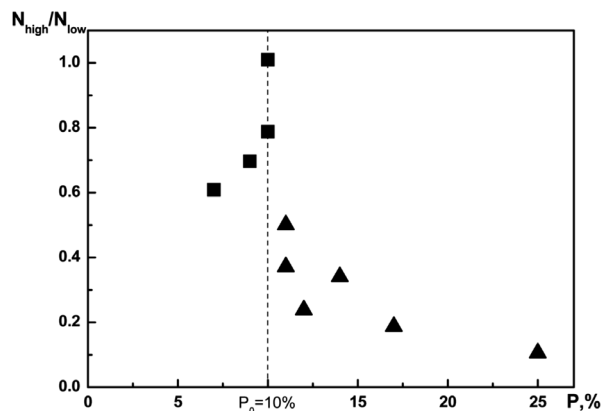


Рис. 3 Зависимость параметра  $n$  от пористости

до значений, близких к пористости  $P \sim 10\%$ , что соответствовало перколяционному переходу, перестройке структуры материала и соответствующей релаксации трещин на сквозном поровом кластере. Виден резкий немонотонный скачок предложенной характеристики на этом пороге.

**Заключение.** Были получены и качественно проанализированы амплитудные распределения и спектральные характеристики акустико-эмиссионных сигналов при разрушении пористого железа. Показано влияние перестройки структуры порового кластера на вид полученных характеристик. Предложен простой числовой параметр, позволяющий выявлять преобладающий механизм деформирования и разрушения пористого материала.

## Библиографический список

1. Андрейкив, А.Е. Метод акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения / А.Е. Андрейкив, Н.В. Лысак. – Киев, 1989.
2. Шкловский, Б.Н. Теория протекания и проводимость сильно неоднородных сред / Б.Н. Шкловский, А.Л. Эфрос // Успехи физических наук. – 1975. – Т. 177, вып. 3.
3. Гусев, О.В. Акустическая эмиссия при деформации монокристаллов тугоплавких металлов / О.В. Гусев. – М., 1982.
4. Ильина, С.Г. Акустическая эмиссия вблизи предела текучести отпущенных сталей / С.Г. Ильина, В.В. Забильский, Д.Л. Мерсон // ФММ. – 1997. – Т. 83, №5.
5. Егоров, А.В. Моделирование акустической эмиссии в пористых металлах при статическом нагружении / А.В. Егоров, В.В. Поляков, И.Н. Свистун, А.А. Лепендин // Экспериментальные методы в физике структурно-неоднородных конденсированных сред : труды II Междунар. конф. – Барнаул, 2001.
6. Стоев, П.И. Акустическая эмиссия титана / П.И. Стоев, И.И. Папилов, В.И. Мошенок // Вопросы атомной науки и техники. – 2006. – №1.
7. Филоненко, С.Ф. Особенности сигналов акустической эмиссии при пластическом деформировании и хрупком разрушении материалов / С.Ф. Филоненко, Н.И. Горынский, В.С. Бирюков // ФХММ. – 1985. – №6.