

УДК 534.08

А.В. Егоров, С.И. Матвеев

Двухчастотный анализ сигналов акустической эмиссии при пластической деформации и разрушении алюминиевых сплавов

Метод акустической эмиссии показал свою эффективность как при решении прикладных задач, связанных с диагностикой ранних стадий разрушения ответственных конструкций, так и в исследовательских задачах при изучении процессов пластической деформации и разрушении конструкционных материалов. При этом анализируется ряд основных информативных параметров акустической эмиссии. Это – число импульсов акустической эмиссии N_{Σ} , суммарный счет N , активность \dot{N}_{Σ} , скорость счета \dot{N} , энергия E . При решении задач исследовательского типа проводят более глубокий анализ сигналов акустической эмиссии. В частности, дополнительно изучают частотный спектр, проводят амплитудный анализ импульсов, исследуют плотность распределения интервалов времени между импульсами акустической эмиссии [1]. Наиболее полную информацию о ее сигнале можно получить с помощью измерительно-вычислительных комплексов, в состав которых входят измерительный датчик, усилитель заряда и плата сбора данных, посредством которой сигнал акустической эмиссии поступает на управляющий компьютер для последующей обработки результатов [2]. При оцифровке исходного сигнала частота дискретизации превышает верхнюю рабочую частоту датчика акустической эмиссии в несколько раз и может иметь значение более 1 МГц. При таком построении комплекса возникает проблема с вычислением основных характеристик в реальном времени, связанная с тем, что вычислительных мощностей компьютера не хватает для обработки большого объема данных и часть информации теря-

ется. В настоящей работе предложена модификация метода детектирования, позволяющего анализировать сигнал акустической эмиссии в реальном времени, и исследована применимость измерений его частотного спектра при пластической деформации и разрушении алюминиевых сплавов.

Частотный спектр сигнала акустической эмиссии обсуждался в целом ряде работ (см., например: [1, 3, 4]). Однако следует отметить, что широкого практического применения при обработке акустических измерений частотный анализ не получил. Это связано с тем, что спектральный состав сигнала в первую очередь определяется индивидуальными характеристиками пьезоэлектрических датчиков акустической эмиссии, а точнее их резонансными свойствами, что затрудняет интерпретацию полученных результатов и делает практически невозможным сопоставление экспериментальных данных, полученных на различных акустических установках. В качестве примера на рисунке 1 приведены результаты частотного анализа сигналов акустической эмиссии при деформации алюминиевого сплава Д16, которые были зарегистрированы резонансным датчиком с центральной частотой 150 кГц и широкополосным датчиком марки GT300. Частотный спектр был получен путем обработки сигналов акустической эмиссии по алгоритму быстрого преобразования Фурье. Из рисунка 1а видно, что для резонансного датчика частотный диапазон зарегистрированного сигнала находится в области резонанса датчика. Спектральный состав сигнала акустической эмиссии, полученного датчиком GT300, значительно шире, что объясняется

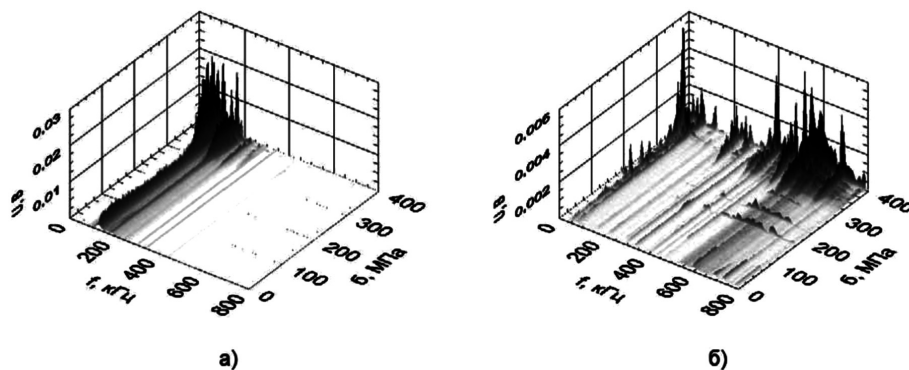


Рис. 1. Частотный спектр сигналов акустической эмиссии при деформации алюминиевого сплава Д16: а) резонансный датчик; б) широкополосный датчик GT300

расширенным рабочим диапазоном частот. Отметим, что в области частот от 100 до 200 кГц гармоники для датчика GT300 практически отсутствуют (рис. 1б), хотя резонансный датчик, работающий в этом частотном диапазоне, надежно регистрирует сигнал акустической эмиссии. Это связано с тем, что различные широкополосные датчики построены либо путем ухудшения резонансных свойств отдельного пьезокристалла, либо на основе матрицы из нескольких пьезоэлементов, и все равно они обладают частотно-избирательными свойствами, хотя и менее выраженными, чем для резонансных датчиков [5]. В частности, исследуя зависимость полного импеданса датчика GT300 (используемого в эксперименте) от частоты, было обнаружено, что в частотном диапазоне от 40 до 100 кГц и на частоте порядка 600 кГц наблюдаются ярко выраженные максимумы. Поэтому вероятность возбуждения датчика на этих частотах при импульсном механическом воздействии возрастает. Следует отметить, что даже при использовании бесконтактных датчиков (например, конденсаторного типа) начинают сказываться резонансные характеристики самого образца, влияющие не только на упругие модули материала, из которого он изготовлен, но и на геометрические размеры самого объекта. Все это приводит к тому, что частотный анализ крайне редко используют в качестве основного критерия при диагностике материала методом акустической эмиссии. Однако следует отметить, что частотный спектр все же несет дополнительную полезную информацию [6, 7], и полностью исключать его из рассмотрения не стоит. В частности, из рисунка 1б видно, что спектральная плотность сигнала меняется в процессе деформирования материала, а именно, изменяется вклад различных частотных диапазонов в общую мощность сигнала акустической эмиссии.

Для проведения измерений в реальном времени была разработана экспериментальная установка, имеющая ряд особенностей. Основные информативные характеристики акустической эмиссии определяли на основе метода детектирования. В рамках данного метода проводили демодуляцию сигнала акустической эмиссии $u(t)$ и получали модулирующую функцию $u(t)$, которую сравнивали с напряжением дискриминации, а также подсчитывали число импульсов, превышающих данный порог либо в единицу времени \dot{N}_Σ , либо за все время наблюдения N_Σ (рис. 2). Следует отметить, что в процессе демодуляции происходила трансформация спектра сигнала из области несущей частоты ω_0 в низкочастотную область модулирующей функции. Поэтому для регистрации $u(t)$ существенно уменьшали частоту дискретизации при оцифровке сигнала. Для определения среднеквадратичного напряжения $u_{\text{эф}}$ представляли сигнал акустической эмиссии $u(t)$ на выходе частотно-избирательного преобразователя в виде:

$$u(t) = U(t)\cos(\omega_0 t). \quad (1)$$

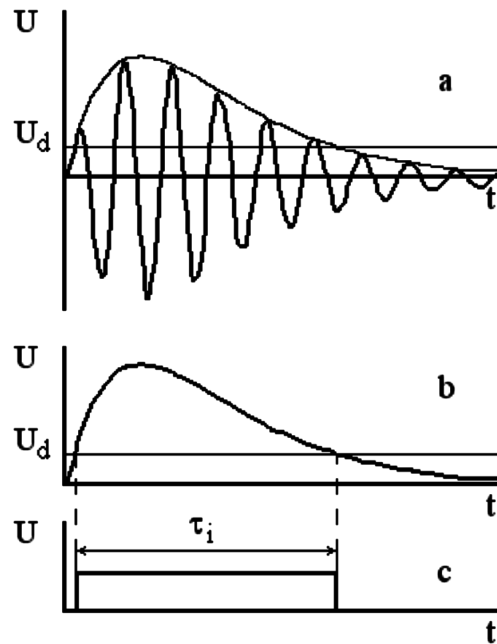


Рис. 2. Временные диаграммы сигналов в методе детектирования: а) исходный сигнал АЭ; б) огибающая сигнала АЭ; в) сформированный прямоугольный импульс

В этом случае для среднеквадратичного значения напряжения выполнялось следующее соотношение:

$$u_{\text{эф}} = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} u^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{2\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} U^2(t) dt} = \frac{U_{\text{эф}}}{\sqrt{2}}, \quad (2)$$

где Δt – временной интервал усреднения; $U_{\text{эф}}$ – среднеквадратичное значение напряжения для огибающей сигнала акустической эмиссии.

Выражение (2) показывало принципиальную возможность восстановления $u_{\text{эф}}$ путем обработки низкочастотной модулирующей функции $u(t)$. Для расширения возможности метода детектирования регистрировали не только наличие сформированных импульсов, но и их длительность (рис. 2в). Это позволило восстановить скорость счета и суммарный счет акустической эмиссии. Поскольку одному импульсу длительностью τ соответствовало $n = 2\pi\omega_0\tau$ число пульсаций, то для вычисления \dot{N} пользовались соотношением:

$$\dot{N} = 2\pi\omega_0 \sum_{i=1}^{N_\Sigma} \tau_i, \quad (3)$$

где τ_i – длительность i -го импульса акустической эмиссии. Суммарный счет акустической эмиссии N получали путем суммирования \dot{N} за все время наблюдения.

Данный алгоритм расчета основных информативных характеристик акустической эмиссии был использован в устройстве, структурная схема которого приведена на рисунке 3. Сигнал с широкополосного датчика 1 усиливался малошумящим предварительным усилителем 2 и поступал на блок полосовых фильтров 3, в котором происходило частотное разделение сигнала акустической эмиссии. К выходам

фильтров подключались усилители 4 и 5 с регулируемыми коэффициентами усиления и амплитудные детекторы 6 и 7, проводящие демодуляцию сигналов в соответствующих частотных диапазонах. Выделенные таким образом огибающие сигналов поступали на плату сбора данных 8. Сюда же передавались сигналы с датчиков силы 9 и перемещения 10, усиленные до необходимого уровня усилителями 11 и 12. Это позволило сопоставлять результаты акустико-эмиссионных и механических испытаний. При расчетах скорости счета и суммарного счета акустической эмиссии считали, что

$$\omega_0 = 2\pi f_m, \quad (4)$$

где f_m – центральная частота m -го канала.

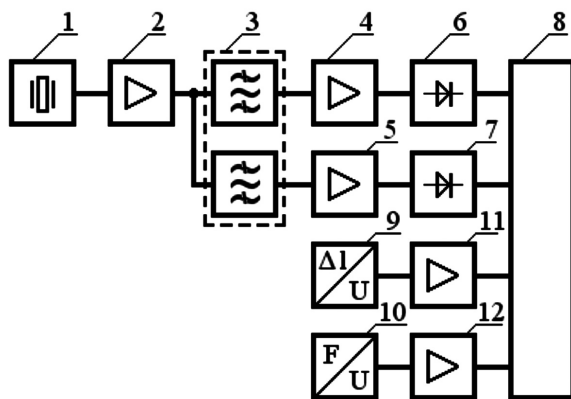


Рис. 3. Структурная схема двухчастотного устройства регистрации сигналов акустической эмиссии

Данная методика обработки сигнала была применена при исследовании акустической эмиссии в процессе механических испытаний образцов, изготовленных из дюралюминия марки Д16. Образцы соответствовали стандарту для испытаний на одноосное растяжение и имели цилиндрическую рабочую часть длиной 15 мм и диаметром 3 мм. Испытания проводили путем деформации с заданной скоростью и измерением сил сопротивления образца этой деформации. По полученным данным строились зависимости напряжения от корня из истинного относительного удлинения. Такое представление результатов позволило выявить линейные участки на кривой деформационного упрочнения, которые соответствуют различным стадиям пластической деформации. Также для каждого канала m строились зависимости мощностей сигнала акустической эмиссии $W_m(\sqrt{e})$, рассчитанные в децибелах по формуле:

$$W_m = 20 \lg \left(\frac{u_{\text{ЭФ}}}{u_{\text{ЭФШ}}} \right), \quad (5)$$

где $u_{\text{ЭФШ}}$ – среднеквадратичное напряжение шума соответствующего канала усилительного тракта.

На рисунке 4а приведены результаты проведенных испытаний. Полученные данные для мощностей сигнала акустической эмиссии сильно зашумлены, что проявляется в резких скачках значений близлежащих экспериментальных точек. Для устранения шумов был применен медианный фильтр. Результаты проведенной обработки представлены на рисунке 4б. На

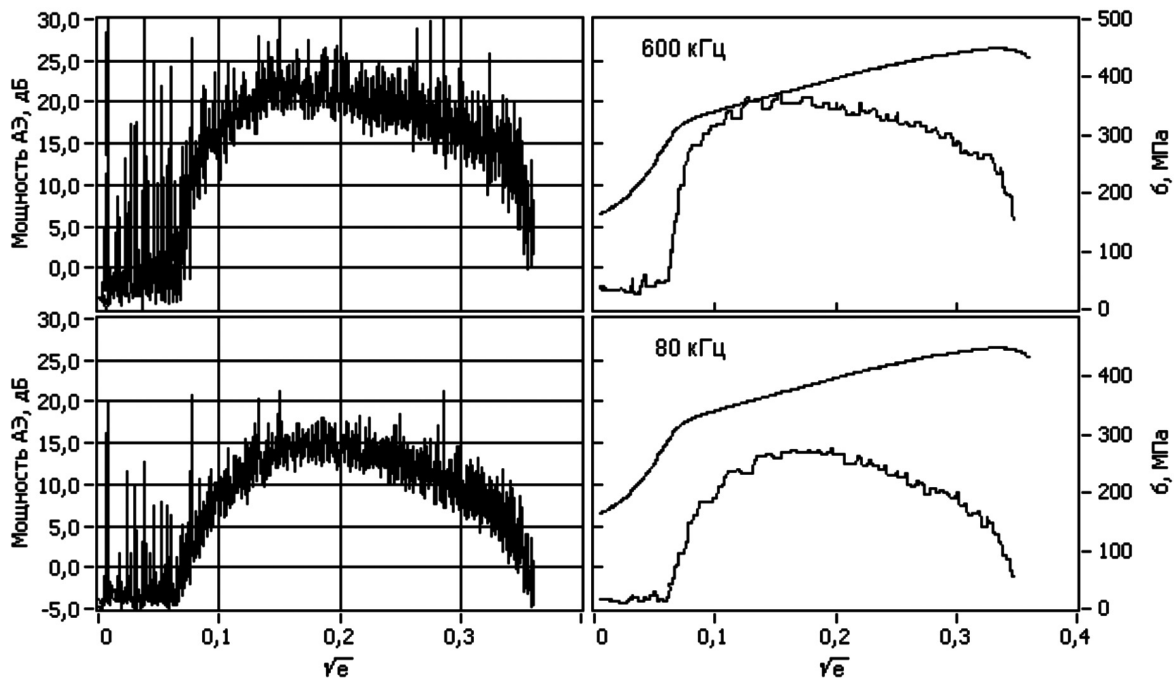


Рис. 4. Мощность акустической эмиссии на частотах 80 и 600 кГц при растяжении образца из алюминиевого сплава Д16 (датчик GT300)

этих же графиках приведена кривая деформационного упрочнения. Видно, что зависимости $W_m(\sqrt{e})$ на частотах 80 и 600 кГц несколько отличаются друг от друга. Для количественного описания этого различия был рассчитан вклад мощности K по формуле

$$K = \frac{u_{\Delta\phi,1}^2}{u_{\Delta\phi,1}^2 + u_{\Delta\phi,2}^2} \quad (6)$$

и построен график $K(\sqrt{e})$, приведенный на рисунке 5 в виде кривой 1. Кривая деформационного упрочнения представлена на этом же рисунке в виде кривой 2. Участки I и II показывают отклонения от линейной зависимости (прямая 2а) кривой $\sigma(\sqrt{e})$. Согласно [8, 9], этот линейный участок соответствует одной из стадий деформационного упрочнения материала. Из рисунка видно, что при этих же значениях \sqrt{e} происходит излом на зависимости $K(\sqrt{e})$. Для наглядности: соответствующие участки кривой 1 аппроксимированы прямыми 1а и 1б. Таким образом, можно говорить о корреляции между стадиями пластической деформации в сплаве Д16 и параметром K , характеризующим

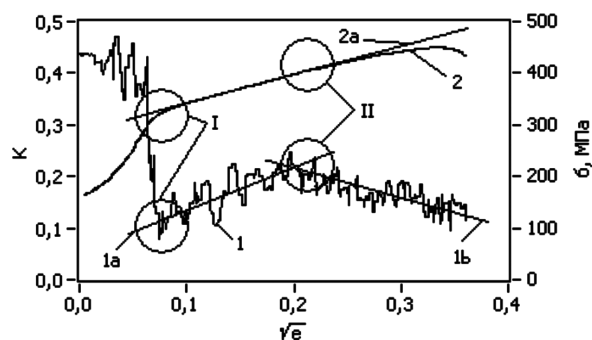


Рис. 5. Энергетический вклад частотной составляющей 80 кГц на разных стадиях деформации для образца из алюминиевого сплава Д16

вклад различных частот в мощность сигнала акустической эмиссии, зарегистрированного широкополосным датчиком GT300.

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности акустико-эмиссионного метода при исследовании деформационного поведения материалов и могут быть использованы для интерпретации сигналов акустической эмиссии, зарегистрированных в процессе диагностики конструкций из алюминиевых сплавов.

Библиографический список

1. Гусев, О.В. Акустическая эмиссия при деформации монокристаллов тугоплавких металлов / О.В. Гусев. – М., 1982.
2. Polyakov, V.V. Investigation of plastic deformation and fracture of PM materials on the basis of acoustic emission method / V.V. Polyakov, A.V. Egorov, I.N. Svistun // Deformation and fracture in PM materials : proc. Intern. conf. – Piestany, 1999. – Vol. 1.
3. Pardee, W.J. Analysis of acoustic emission frequency spectra / W.J. Pardee, L.J. Graham // Ultrasonics symposium. – 1975.
4. Муравин, Г.Б. Исследование спектральной плотности сигналов акустической эмиссии / Г.Б. Муравин, Л.М. Лезвинская // Дефектоскопия. – 1982. – №7.
5. Алешин, Н.П. Методы акустического контроля металлов / Н.П. Алешин, В.Е. Белый, А.Х. Вopilкин и др. – М., 1989.
6. Шип, В.В. Анализ акустических и механических параметров развития трещин нормального разрыва и поперечного сдвига в конструкционном материале / В.В. Шип, Г.Б. Муравин, Л.М. Лезвинская, И.С. Самойлова // Дефектоскопия. – 1992. – №11.
7. Поляков, В.В. Применение метода акустической эмиссии для исследования разрушения порошковых металлов / В.В. Поляков, А.В. Егоров // Порошковая металлургия. – 2007. – №30.
8. Баньковский, О.И. Геометрическое и зернограничное разупрочнение пористого железа / О.И. Баньковский, В.Ф. Моисеев, Э.П. Печковский, Н.И. Щербань // Порошковая металлургия. – 1988. – №6.
9. Поляков, В.В. Исследование особенностей акустической эмиссии при пластической деформации и разрушении пористых металлов / В.В. Поляков, А.В. Егоров, И.Н. Свиcтун // Дефектоскопия. – 2001. – №9.