



УДК 620.179.16

© 2004 г. **В.Н. Овчарук,**

Чье Ен Ун, д-р техн. наук

(Хабаровский государственный технический университет)

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ ОБРАЗЦОВ ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

В работе приводятся результаты исследования и методика идентификации механических параметров по вторичным параметрам временных рядов акустической эмиссии (АЭ), полученных в результате обработки спектрограмм сигналов АЭ в реальном времени.

Введение

В настоящей работе рассмотрена методика идентификации сигналов акустической эмиссии (АЭ) с механическими характеристиками материала, реализованная в автоматизированной системе сбора и обработки информации. В качестве информативных характеристик АЭ, наряду с общеизвестными, – такими как активность $\bar{N}_\Sigma(i)$ и число импульсов $N_\Sigma(i)$ (ГОСТ 25.002-80), амплитуда огибающей сигнала – $U(i)$, использовали и вторичные параметры временных рядов, слабо зависящие от деформируемого объема исследуемого материала по сравнению с традиционными параметрами сигналов АЭ.

Структура информационно-измерительного комплекса

С целью уточнения физической природы акустических сигналов, регистрируемых при статических испытаниях образцов материалов, были проанализированы спектральные характеристики сигналов АЭ. Анализ сигналов проводился на установке, базовым элементом которой являлся анализатор спектра одновременного действия, описанный в работе [1]. Он позволяет анализировать спектр акустических сигналов в 100 дискретных точках в диапазоне частот 0,02 – 2,0 МГц. Полоса анализа в каждой дис-

кретной точке по частоте составляет 2,0 кГц. Приемный пьезопреобразователь изготовлен по способу, описанному в работе [2]. Структурная схема установки приведена на рис. 1.

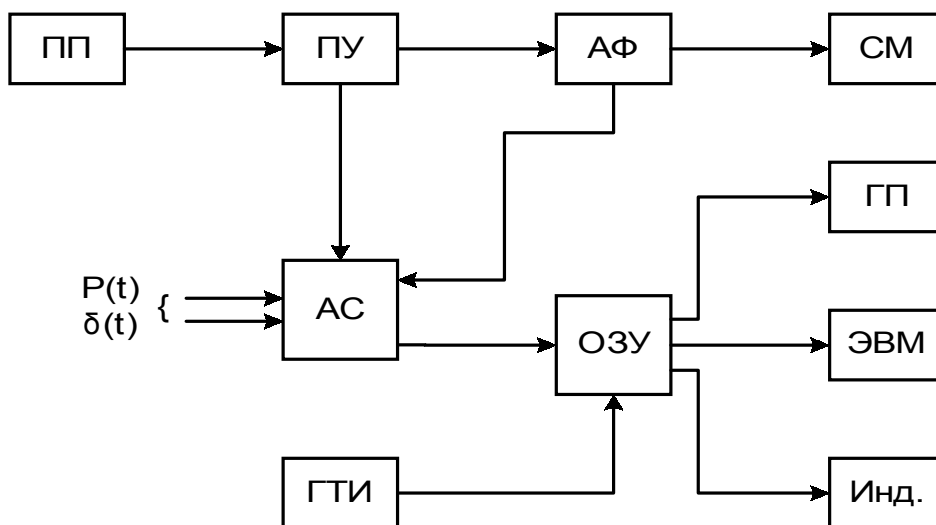


Рис. 1. Структурная схема установки.

Учитывая то обстоятельство, что большой поток информации трудно обрабатывать в реальном масштабе времени, в состав установки включили генератор тактовых импульсов (ГТИ), который обеспечивал случайную выборку при анализе входного сигнала на заданном интервале времени (0,1 – 0,5 сек.). Одновременно со спектром входного сигнала регистрировалась величина нагружающего усилия $P(t)$ и деформация $\delta(t)$. Вся полученная информация через ОЗУ поступала в вычислительный комплекс для обработки.

Обработка поступающей информации проводилась поэтапно. Первый этап включал аппаратную селекцию (блок АФ), связанную с формированием блоков данных для дальнейшей обработки. Блоком АФ исключались спектрограммы, зарегистрированные с искажениями, а также сигналы шумов и помех, идентифицированные по результатам предварительных исследований [3,4].

Методика обработки спектральных функций

Вторичными параметрами временных рядов АЭ названы последовательности, полученные в результате обработки спектрограмм сигналов АЭ в реальном времени, одна из которых приведена на рис. 2.

Весь диапазон частот разбит в соответствии с логарифмической шкалой. По оси ординат отложены усредненные значения амплитуды сигналов АЭ в каждом из частотных каналов.

Вторичные параметры потока сигналов АЭ определялись следующим образом.

Последовательность максимальных значений спектральной плотности (последовательность «максимумов вкладов»)

$${}^j B(i) = \max_{\forall l_1 = \overline{1, L - \Delta}} \left\{ \frac{\sum_{l=l_1}^{l=l_1+\Delta} {}^j S(i, l) \cdot \Delta\omega_l}{\sum_{l=2}^L {}^j S(i, l) \cdot (\omega_l - \omega_{l-1})} \right\}, \quad (1)$$

где j – номер эксперимента; i – номер временного отсчета; l – номер частотного диапазона; L – количество частотных диапазонов; Δ – количество частотных диапазонов, входящих в скользящее спектральное окно; $\Delta\omega_l = \omega_{l+\Delta} - \omega_l$ – разность частот между правым и левым значениями спектрального окна; ${}^j S(i, l)$ – значения усредненной амплитуды сигналов АЭ в j -м эксперименте в l -м частотном канале в i -й момент отсчета ($i \in \{1, I_j\}$).

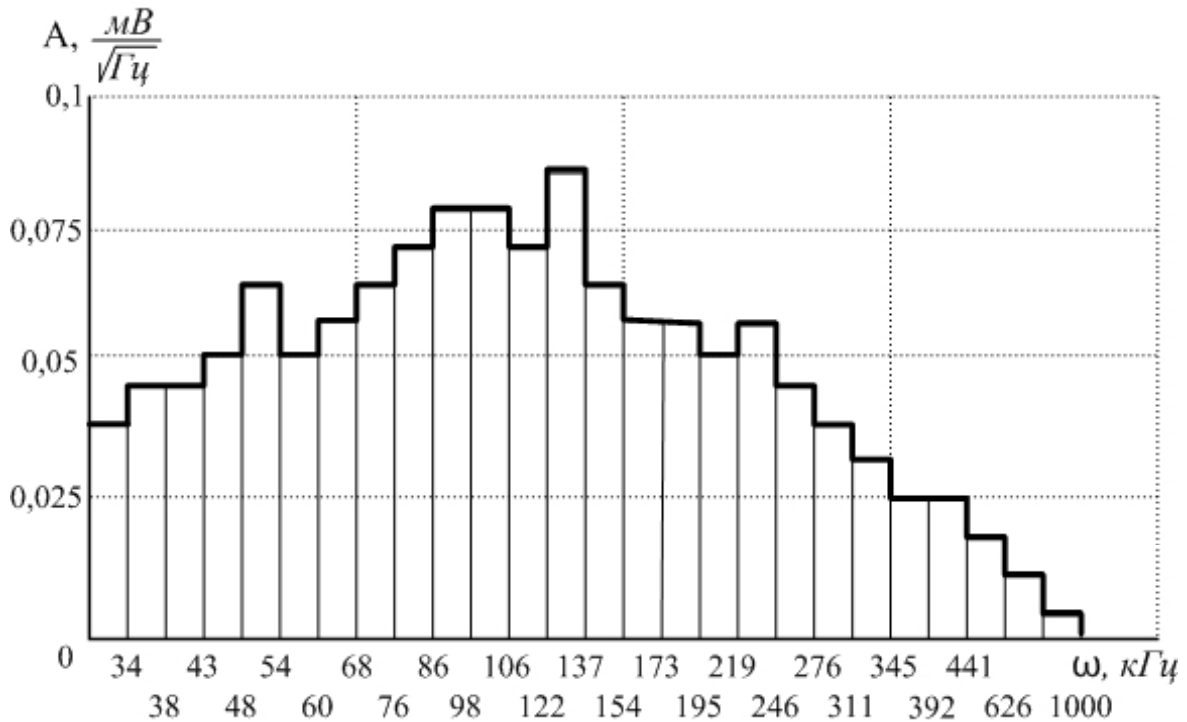


Рис. 2. Спектрограмма мгновенного спектра сигналов АЭ.

Слабая зависимость ${}^j B(i)$ от деформируемого объема обусловлена тем, что в выражении (1) изменение деформируемого объема вызывает адекватное изменение как числителя, так и знаменателя (для гипотезы линейного суммирования повреждений). В реальных экспериментах адекватность полностью не сохраняется вследствие того, что суммирование повреждений не подчиняется принципу суперпозиции.

Последовательность скоростей изменения ${}^j B(i)$

$${}^j V_B(i) = {}^j B(i + l) - {}^j B(i) \quad (2)$$

Последовательность ускорений «максимумов вкладов»

$${}^j a_B(i) = \Delta {}^j V_B(i+1) - {}^j V_B(i). \quad (3)$$

Последовательность значений автоковариационной функции спектральной плотности сигналов АЭ

$$R[{}^j S(i+1, l), {}^j S(i, l)] = \sum_{l=1}^L \frac{{}^j S(i, l) \cdot {}^j S(i+1, l)}{L} - \sum_{l=1}^L \frac{{}^j S(i, l)}{L} \cdot \sum_{l=1}^L \frac{{}^j S(i+1, l)}{L}. \quad (4)$$

Последовательность дисперсий спектральной плотности АЭ

$${}^j D(i) = \sum_{l=1}^L \left[{}^j S(i, l) - \sum_{l=1}^L {}^j S(i, l) \cdot L^{-1} \right]^2 \cdot (L-1)^{-1}. \quad (5)$$

Слабая зависимость автоковариационной функции и дисперсии от деформации объема обусловлена тем, что соотношения (4) и (5) являются асимптотически эффективными оценками. Увеличение деформируемого объема приводит к уточнению этих оценок, а не к их принципиальному изменению [5].

Очевидно, что для определения по сигналам АЭ значений характеристик механических свойств исследуемого материала необходимо располагать некоторой функциональной зависимостью между нагружающим воздействием ${}^j P(i)$, с одной стороны, и какой-либо из указанных выше последовательностей потока АЭ, – с другой. Естественно, если данную функциональную зависимость искать в линейной форме, то из рассмотренных последовательностей АЭ следует прежде всего выделить ту, у которой коэффициент корреляции наибольший по отношению к ${}^j P(i)$. Поэтому в настоящей методике предусмотрено вычисление коэффициента корреляции между всеми последовательностями, выделенными из потока сигналов АЭ, и траекторией ${}^j P(i)$. В результате получено следующее множество коэффициентов корреляции: $\{ {}^j R_k \}$ $k = 1, 7$, причем $\max \left\{ \sum_{j=1}^L R_k \right\}$ соответствует

последовательности ${}^j \xi(i)$, где ${}^j \xi(i)$ – последовательность, наиболее коррелируемая с ${}^j P(i)$. Функционал $U * {}^j \xi(i)$, отображающий ${}^j \xi(i)$ на ${}^j P(i)$, строится так:

$$U * [{}^j \xi(i)] = {}^j A(i) \cdot {}^j \xi(i) + {}^j B,$$

где ${}^j A(i)$ и ${}^j B$ – коэффициенты идентификации. Введем обозначение

$$S = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \left[{}^j P(i) - {}^j A(i) \cdot {}^j \xi(i) - {}^j B \right]^2 \rightarrow \min_{{}^j A(i), {}^j B}. \quad (6)$$

Очевидно, что минимум (6) определяется из следующих условий:

$$\frac{\partial S}{\partial {}^j A(i)} = 2 \cdot \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} \left[{}^j P(i) - {}^j A(i) \cdot {}^j \xi(i) - {}^j B \right] {}^j \xi(i) = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial S}{\partial {}^j B} = 2 \cdot \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} \left[{}^j P(i) - {}^j A(i) \cdot {}^j \xi(i) - {}^j B \right] = 0. \quad (8)$$

Преобразуем (7) следующим образом :

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} {}^j P(i) \cdot {}^j \xi(i) = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} {}^j A(i) \cdot {}^j \xi^2(i) + \sum_{j=1}^J {}^j B \sum_{i=1}^{I_j} {}^j \xi(i).$$

Аналогичные преобразования осуществим в (8), что позволит получить следующую систему уравнений для определения коэффициентов ${}^j A(i)$ и ${}^j B$:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} {}^j A(i) \cdot {}^j \xi^2(i) + \sum_{j=1}^J {}^j B \sum_{i=1}^{I_j} {}^j \xi(i) = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} {}^j P(i) \cdot {}^j \xi(i), \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} {}^j A(i) \cdot {}^j \xi(i) \cdot \sum_{j=1}^J I_j \cdot {}^j B = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} {}^j P(i).$$

Следует отметить, что (8) – это система с $\left(\sum_{j=1}^J I_j + J \right)$ неизвестными из $\left(\sum_{j=1}^J I_j + J \right)$ уравнений. Ее решениями являются те значения ${}^j A(i)$, ${}^j B$, которые удовлетворяют условию (6).

После определения коэффициентов ${}^j A(i)$, ${}^j B$, $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J}$ становится очевидным, что в любом из ранее проведенных экспериментов последовательность ${}^j \xi(i)$ с определенной степенью точности воспроизводит ${}^j P(i)$ посредством функционала $U * \left[{}^j \xi(i) \right]$. Для проверки правильности сделанных выводов проведем сопоставление расчетных и экспериментальных данных.

Результаты экспериментальных исследований

Исходные данные для проверки рассматриваемого математического аппарата получены из следующего эксперимента. На установке «Instron-ТТК-1126» при скорости нагружения 0,2 кг/мм были испытаны на растяжение 10 образцов из алюминиевого сплава Д20. Для каждого образца за время нагружения до разрушения снималось от 28 до 32 спектрограмм. Одновременно снимались значения ${}^j U(i)$, ${}^j \bar{N}_\Sigma(i)$, ${}^j N_\Sigma(i)$. Результаты

расчетов коэффициентов корреляции $^j r$ некоторых параметров последовательности сигналов АЭ с кривой $^j P(i)$ приведены в табл. 1.

Таблица 1

№ эксп. (j)	$^j r(P, I)$	$^j r(P, N_{\Sigma})$	$^j r(P, B)$	$^j r(P, D)$	$^j r(P, R)$
1	0,521	0,865	0,406	0,907	0,403
2	0,450	0,418	0,051	0,436	0,212
3	0,312	0,316	0,078	0,723	0,239
4	0,577	0,440	0,111	0,492	0,179
5	0,760	0,581	0,660	0,658	0,226
6	0,191	0,214	0,224	0,732	0,150
7	0,436	0,625	0,305	0,684	0,412
8	0,671	0,458	0,160	0,826	0,551
9	0,356	0,464	0,283	0,653	0,336
10	0,374	0,588	0,116	0,892	0,596

Как видно, наиболее высокими значениями коэффициента корреляции для данного материала обладает последовательность дисперсий мгновенных спектров $^j D(i)$.

Решение задачи идентификации для рассматриваемой последовательности свидетельствует (рис. 3), что расхождения между $^j P(i)$ и $U * [^j D(i)]$ весьма незначительны.

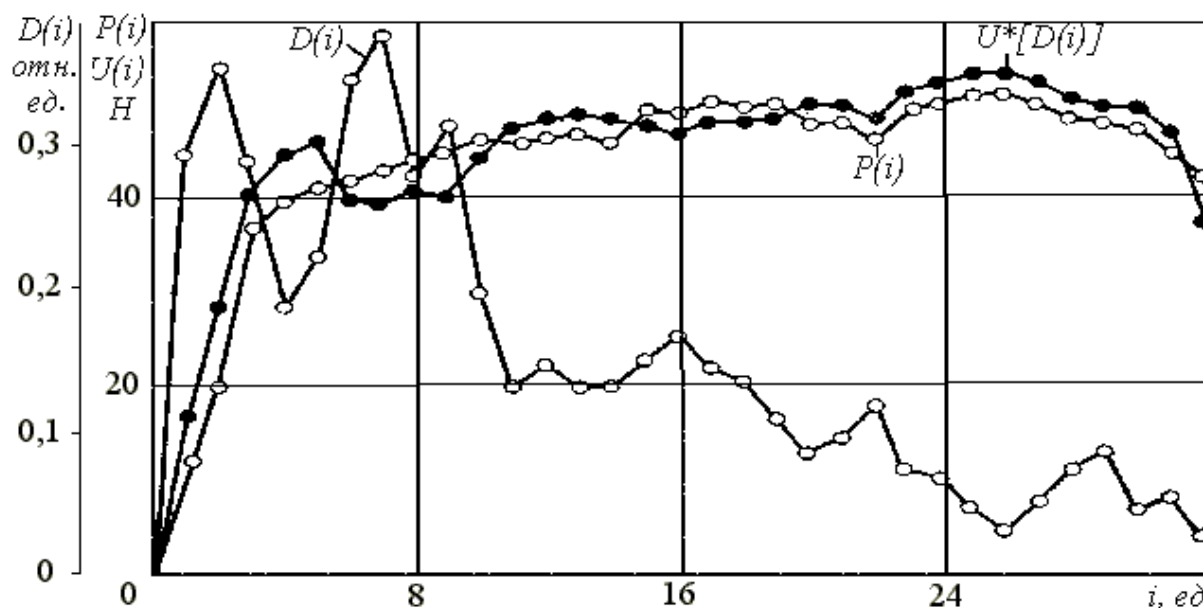


Рис. 3. График зависимостей $P(i)$, $D(i)$, $U * [^j D(i)]$.

С целью проверки точности идентификации по кривым $U * [^j D(i)]$ и $^j P(i)$ в соответствии с ГОСТ 1497-73 определяли значения предела текучести $\sigma_{0,2}$ и временного сопротивления σ_B . Анализ полученных данных (табл. 2) показывает, что дисперсия при определении $\sigma_{0,2}$ и σ_B по кривой $^j P(i)$ для 10 экспериментов составляет 4,5 и 0,2%, а по кри-

вой $U * [{}^j D(i)]$ – приблизительно 30 и 12%.

Таблица 2

№ эксперимента	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\sigma_B, \text{МПа}$	$\xi\sigma_{0,2}$	$\xi\sigma_B$
1	35	51	1,8	1,2
2	33	52	1,5	1,0
3	38	52	2,1	1,1
4	35	52	2,1	1,1
5	39	52	2,5	0,7
6	35	52	1,5	0,8
7	33	52	1,3	1,4
8	35	52	0,8	1,7
9	37	52	1,4	0,7
10	33	51	0,7	1,7
Дисперсия	0,04456	0,00178	0,316	0,1224

Математическое ожидание абсолютных величин $\sigma_{0,2}$, σ_B определялось со значениями:

$$\sigma_{0,2} = 391 \text{ МПа} \text{ и } \sigma_B = 530 \text{ МПа} - \text{ по кривым } {}^j P(i);$$

$$\hat{\sigma}_{0,2} = 446,7 \text{ МПа} \text{ и } \hat{\sigma}_B = 519,2 \text{ МПа} - \text{ по кривой } U * [{}^j D(i)].$$

Таким образом, приведенная погрешность в определении значений $\sigma_{0,2}$ и σ_B по кривой $U * [{}^j D(i)]$, если считать значения, полученные по кривой ${}^j P(i)$ в качестве истинных, составляет $\delta\sigma_{0,2} = 10,5\%$ и $\delta\sigma_B = 2\%$.

Заключение

Показана возможность идентификации механических характеристик с помощью сигналов АЭ. Применение информационно-измерительного комплекса позволяет на основании модели, построенной с использованием статистики предварительных испытаний (8-10 образцов), идентифицировать по сигналам АЭ параметры механических характеристик, представляющие интерес для исследователя, с ошибкой 10...15 %, что, учитывая интегральность метода, является достаточно приемлемым результатом.

Рассмотренная методика и данные, иллюстрирующие ее применение, позволяют существенно расширить область использования метода АЭ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Установка «Спектр» для анализа спектральных характеристик акустической эмиссии / Лыков Ю.И., Горбунов А.И., Овчарук В.Н. и др. // Дефектоскопия. 1988. №1. С.31-36.



2. Авт. свид. №534624. Способ изготовления пьезоэлектрических преобразователей / Колмогоров В.Н., Пащенко Г.Ф. // Бюл. ОИПОТЗ. 1976. №43. С.162.
3. Горбунов А.И., Лыков Ю.И. Влияние амплитудно-частотной характеристики объекта на спектральные характеристики сигналов акустической эмиссии // Дефектоскопия. 1986. №9. С. 39-45.
4. Авт. свид. №1527577. Способ обнаружения развивающихся трещин / Лыков Ю.И., Овчарук В.Н. // Бюл. ОИПОТЗ. 1989. №45.
5. Крамер Г. Математические методы статистики. М.: Мир, 1975.

УДК 548.571

© 2004 г. **А.Н. Чибисов**

(Амурский государственный университет, Благовещенск),

В.Г. Заводинский, д-р физ.-мат. наук

(Институт материаловедения ХНЦ ДВО РАН, Хабаровск)

КОМПЬЮТЕРНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СТЕХИОМЕТРИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ¹

Методом функционала плотности и методом псевдопотенциала рассчитана равновесная атомная и электронная структура стехиометрических наночастиц ZrO_2 с размерами около 1 нм. Выявлено, что частицы с кубической симметрией более стабильны, чем с тетрагональной. Электронная структура наночастиц содержит энергетическую щель на уровне Ферми.

Введение

Диоксид циркония (ZrO_2) интересен как керамический материал, обладающий полезными оптическими, электрическими, термическими, прочностными и другими свойствами. При температурах ниже 1400 °К термодинамически устойчивой является моноклинная фаза (m) чистого диоксида циркония. От 1400 до 2570 °К диоксид циркония существует в тетрагональной фазе (t), а выше 2570 °К вплоть до точки плавления (2980 °К)

¹ Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 040297000) и Дальневосточного отделения Российской Академии наук (грант 04-2-1-00-010).