

PACS: 62.20.Fe, 62.80.+f

В.Л. Бусов

### АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ В ОПЫТАХ ПОД НАГРУЗКОЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО РАЗВИТИЯ

Краматорский экономико-гуманитарный институт  
84300, г. Краматорск, ул. Парковая, 43а

*Рассмотрен акустический метод обратного рассеяния (схема прозвучивания, алгоритмы обработки осциллограмм принятого сигнала), предложено его практическое использование. Кратко описаны три возможных направления применения данного метода контроля образцов и изделий в условиях эксплуатации под нагрузкой.*

Успехи физики пластичности и разрушения за последнюю четверть века в немалой степени связаны с широким применением электронной микроскопии (ЭМ) в различных экспериментах, особенно под нагрузкой. Необходимость использования тонких фольг, напыленных пленок, деформирование образцов в колонне микроскопа в условиях вакуума существенно ограничивают диапазон применения метода ЭМ [1].

В последнее время все чаще используется его аналог – метод акустической микроскопии, для которого существует принципиальная возможность на частотах от 100 до 50000 МГц наблюдать объекты размером от 30 до 0.1  $\mu\text{m}$ , т.е. изучать формирование фрагментированной структуры и эволюцию одиночного фрагмента при пластической деформации. Однако пока он уступает методу ЭМ: известны лишь отдельные разработки акустических микроскопов на частотах 25–200 МГц [2].

Давно существуют и другие акустические методы – ультразвуковой (УЗ), акустической эмиссии, структуроскопии, измерения скорости распространения УЗ-волн [3], а также обратного рассеяния.

В последнем методе УЗ-пучок от пьезопреобразователя, работающего в режиме излучения–приема, вводится через иммерсионный слой в образец. Амплитуда сигнала  $A$ , рассеянного от структуры, служит основной характеристикой для определения величины коэффициента рассеяния УЗ-волн  $\alpha_s$  [ $\text{m}^{-1}$ ] и распределения его по глубине образца. Согласно [4]

$$A^2(x) = A_0^2 \delta \alpha_s(x) \exp(-2\overline{\alpha_{sx}}x), \quad (1)$$

где  $A_0$  и  $A(x)$  – амплитуды соответственно падающей волны на поверхности образца и обратного рассеяния на расстоянии  $x$  от этой поверхности из

рассеивающего импульсного объема;  $\delta$  – пространственная длительность импульса УЗ-волн;  $\overline{\alpha_{sx}}$  – средний коэффициент рассеяния на интервале  $x$ ,

$$\overline{\alpha_{sx}} = \frac{1}{x} \int_0^x \alpha_s(z) dz. \quad (2)$$

Применимость выражения (1) ограничена рядом условий: пренебрегают многократным рассеянием; коэффициент поглощения  $\alpha_a$  либо равен нулю, либо как систематическая поправка входит в показатель экспоненты из (1):  $\overline{\alpha_{sx}} + \alpha_a$ .

Существуют две модификации метода обратного рассеяния [5–7]:

а) ввод УЗ-пучка по нормали к поверхности образца;

б) ввод УЗ-пучка под углом, превышающим первый критический угол, или ввод поперечных УЗ-волн. Здесь сигнал, рассеянный от структуры, отделен от сигнала, рассеянного от поверхности.

Первая модификация метода [6] была создана американскими учеными из Carnegie Mellon University. Она позволила установить надежную корреляционную связь между значениями коэффициента затухания  $\alpha_d$  УЗ-волн, а также пределов текучести  $\sigma_{0.2}$  и прочности  $\sigma_b$ .

Вторую модификацию применил и описал немецкий инженер Я. Коппельман [5]. В дальнейшем его развили К. Goebbel и Н. Willems [7] в институте Фраунгофера (Германия), применившие метод для определения величины (балла) исходного зерна и разнотекстурности в поликристаллическом образце. Основной особенностью этого подхода является достаточно высокая локальность контроля, позволяющая зафиксировать изменение  $\alpha_s$  в пределах интервалов длин 30–300  $\mu\text{m}$  на частотах заполнения 10–100 МГц.

В данной работе использована вторая модификация метода обратного рассеяния. С помощью данного метода нами получена кривая зависимости коэффициента рассеяния УЗ-волн  $\alpha_s$  от числа циклов  $N_c$  при усталостных испытаниях стальных образцов – акустическая кривая усталости [8]. Для ее построения используют выражение (1) и ряд алгоритмов обработки сигналов, рассеянных от структуры волн, в основе которых лежит дискретизация огибающей эхо-сигнала и последующая статистическая обработка точечного массива на персональном компьютере [9]. Мы применили упрощенный алгоритм: экспоненциальный член из выражения (1) подвергли разложению по степеням  $(\overline{\alpha_{sx}}x)$ ; обе части (1) усредняли согласно (2);  $A$  и  $A_0$  выражали в децибелах с помощью ступенчатого аттенюатора дефектоскопа. В результате пришли к выражению для  $\overline{\alpha_{sx}}$  (коэффициент  $\alpha_a$  принимали равным нулю, флуктуациями  $\alpha_s(x)$  на длине  $x$  пренебрегали):

$$\overline{\alpha_{sx}} = \frac{2\overline{A_x}}{A_0\delta^* \left( 1 + \sum_i \eta_i(\overline{\alpha_{sx}}) \right)} = \frac{\overline{\alpha_x(0)}}{1 + \sum_i \eta_i(\overline{\alpha_{sx}})}, \quad (3)$$

где  $\overline{A_x}$  – средняя амплитуда обратного рассеяния;  $\delta^*$  – эффективная длительность импульса ( $\delta^* = 3 \text{ mm}$ );  $\sum_i \eta_i$  – сумма последующих  $i$ -х членов разложения экспоненты (здесь ограничились  $i = 4$ );  $\overline{\alpha_x}(0) = 2\overline{A_x}/A_0\delta^*$  при  $\sum_i \eta_i = 0$ . Искомое значение  $y = \overline{\alpha_{sx}}$  [ $\text{mm}^{-1}$ ] при  $x = 5 \text{ mm}$  найдем из уравнения

$$\frac{\overline{\alpha_{sx}}(0)}{y} = 1 - 10y + 50y^2 - \frac{10^3}{6}y^3 + \frac{10^4}{24}y^4. \quad (4)$$

Зависимость  $\alpha_s = \alpha_s(N_c)$ , типичная для всех исследованных объемов образцов и нагрузок, приведена в [8]. Акустические кривые усталости экспериментально получены для сплавов Al–Mg–Si, серых чугунов, для низко- и среднелегированных марок сталей [10]. В [8,11] показано, что известная теория коэффициента рассеяния УЗ-волн [12] может быть использована только при существенных ограничениях (импульсное прозвучивание, квазистатическое приближение и т.д.). Обоснование характера поведения акустической кривой усталости возможно с помощью динамических уравнений эволюции [1,13–16] и последующей доработки теории рассеяния.

В настоящее время выделяются три направления применения метода обратного рассеяния в опытах под нагрузкой:

1. Прогнозирование долговечности и остаточного ресурса образцов и реальных изделий в условиях эксплуатации с помощью акустической кривой усталости.

2. Определение начала роста микротрещин и построение акустического аналога кривой роста трещин. В процессе роста микротрещины перед ее вершиной возникает цепочка субмикротрещин (СМТ), которые раскрываются и захлопываются в соответствующих полуциклах силового воздействия. Затем микротрещина необратимо раскрывается путем объединения СМТ [17]. В работе [10] был предложен метод осцилляций (частота вынужденных колебаний 50–100 Hz) принятого сигнала, возникающего при прозвучивании образцов поверхностными волнами двумя пьезопреобразователями по схеме излучатель–приемник. Построена зависимость относительного изменения амплитуды осцилляций сигнала от числа циклов при различных нагрузках [10], которая, по-видимому, является акустическим аналогом известной кривой роста усталостных трещин [18]. Обоснование данного соответствия и теория этого метода отсутствуют.

3. Оценка уровня остаточных напряжений в изделиях осесимметричной формы после поверхностной закалки и в условиях эксплуатации. Регрессионные кривые  $\sigma_{0,2} = \sigma_{0,2}(\alpha_s)$ ,  $\sigma_b = \sigma_b(\alpha_s)$ , полученные в области Рэлея ( $\lambda/D > 2\pi$ ,  $\lambda$  – длина УЗ-волны,  $D$  – средний диаметр зерна) для всего объема образцов из углеродистых (0.06–0.35% C) слаболегированных (содержание Mn, Si < 0.35%) сталей [6], позволяют указать интервал, в котором лежат значения компонент деформирующего напряжения  $\overline{\sigma}_i$  как интегральной ме-

ры сопротивления деформации:  $\sigma_{0.2} < \sigma_i < \sigma_b$ . В закаленном слое валков экспериментально (методом многократных отражений на плоскопараллельных темплетях) получено распределение коэффициента затухания УЗ-волн  $\alpha_d$  по глубине образца (рис. 5.1; 5.2; 5.8; 5.14 [19]). Характер поведения данного распределения определяется режимом поверхностной закалки: при числе подогревов свыше трех оно является осциллирующим, так же меняется и вилка с  $\sigma_j$ . Подобную форму имеет и огибающая рассеянного сигнала (рис. 8.1, 8.13 [19]). Ясно, что такая оценка  $\sigma_j$  как уровня остаточных напряжений является грубой. Для повышения ее точности необходимо найти строгое выражение  $\bar{\sigma}_j = \bar{\sigma}_j(\alpha_s)$ .

1. *Е.А. Попов, В.С. Иванова, В.Ф. Терентьев*, в сб.: Синергетика и усталостное разрушение металлов, В.С. Иванова (ред.), Наука, Москва (1989), с. 153.
2. *В.М. Левин*, Лабораторный малогабаритный акустический микроскоп, Институт биохимической физики РАН (1999).
3. *Методы неразрушающих испытаний*, Р. Шарп (ред.), Мир, Москва (1972).
4. *J. Koppelman, B. Fay*, *Acustica* **29**, 297 (1973).
5. *J. Koppelman*, *Materialprüfung* **9**, 11, 401 (1967).
6. *R. Klinman, G.R. Wabster, F.J. March, E.T. Stephenson*, *Material Evaluation* **38**, № 10, 26 (1980).
7. *H. Willems, K. Goebbels*, Characterization of microstructure by scattered ultrasonic waves, 10<sup>th</sup> World Conference on Non-destructive Testing, **1A-30**, 39 (1982).
8. *В.Л. Бусов, Т.Д. Шермергор*, ФТВД **12**, № 1, 60 (2002).
9. *Д. Даджион, Р. Мерсеро*, Цифровая обработка многомерных сигналов, Мир, Москва (1988).
10. *А.А. Рыбник, И.Н. Ермолов*, Труды ЦНИИТмаш **165**, 42 (1981).
11. *В.Л. Бусов, А.Н. Хабаров*, ФТВД **12**, № 2, 95 (2002).
12. *Т.Д. Шермергор*, Теория упругости микронеоднородных сред, Наука, Москва (1977).
13. *Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц*, Статистическая физика, Ч. 1, Наука, Москва (1976).
14. *А.И. Олемской, В.А. Петрунин*, Изв. вузов. Физика **30**, № 1, 82 (1987).
15. *О.М. Градов, Е.А. Попов*, в сб.: Синергетика и усталостное разрушение металлов, В.С. Иванова (ред.), Наука, Москва (1989), с. 138.
16. *В.Е. Панин, В.В. Федоров, Р.В. Ромашов и др.*, там же, с. 29.
17. *И.В. Владимиров*, Физическая природа разрушения металлов, Металлургия, Москва (1984).
18. *С. Коцаньда*, Усталостное растрескивание металлов, Металлургия, Москва (1990).
19. *Л. Бусов*, Дисс. ... канд. техн. наук, ЦНИИТмаш, Москва (1991).

*V.L. Busov*

AN ULTRASONIC BACKWARD SCATTERING METHOD  
IN EXPERIMENTS UNDER LOAD AND ITS PROSPECTS

An ultrasonic backward scattering method and its ultrasonic test configurations, mathematical models for backward scattering signal processing, use in industrial fields are presented. Three possible ways for method using *in situ* for controlling the specimens and wares at maintenance conditions are considered.