

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ АМД–МЕТОДАМИ

Зеленов В.М., Кустов А.И., Мигель И.А.¹

*Воронежский государственный педагогический университет
ВУНЦ ВКС ВВА им. профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А. Гагарина
г. Воронеж, Россия, E-mail: akvor@yandex.ru*

Актуальность проблемы исследования структуры металлических материалов не вызывает сомнений, так как именно её параметрами определяется набор их физических свойств. При этом ведущая роль принадлежит прочностным характеристикам, задаваемым параметрами внешних воздействий. Решение проблемы оценки прочностных свойств материалов в зависимости от внешних воздействий осуществлялось с помощью инновационных методов исследования структуры и свойств материалов – АМД–методов [1]. Они позволяют проводить мониторинг состояния материалов, как на основе акустических изображений, так и с использованием характерных зависимостей выходного акустического сигнала – $V(Z)$ –кривых [2].

Метод $V(Z)$ –кривых позволил рассчитать значения скоростей акустических волн (например, поверхностных v_R) с точностью до 0,2%. Деформация металла, возникновение упругих прочностных свойств материалов или микротрещин, всё это проявляется в трансформации характерной зависимости выходного сигнала преобразователя V от расстояния Z до линзы. Целью настоящей работы было изучение изменений характеристик AB ($\Delta V/V\%$ и v_R) при изменении параметров их деформационного состояния и анализ корреляционных связей характеристик материала и параметров AB . В работе объектами изучения были чистые металлы и стали, подвергнутые различным внешним воздействиям, прежде всего деформационным. Предварительные исследования посвящены работе с модельными объектами и позволили оценить чувствительность прибора, его разрешающую способность, определить глубину визуализации. С учетом выводов геометрической модели [3]:

$$\Delta Z_N = \frac{v_l}{2 \cdot f} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{v_l}{v_R} \right)^2} \right]^{-1} \quad (1) \quad v_x = v_l \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{v_l}{2 \cdot f \cdot \Delta Z_N} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

где λ_R –длина поверхностной акустической волны, θ_R –угол Рэлея, v_l – скорость продольной волны в иммерсионной жидкости, λ_l – длина продольной волны в иммерсионной жидкости; f – рабочая частота САМ; N – количество максимумов на кривой $V(Z)$. Величина v_R , а также высота главного максимума $V(Z)$ –кривых – информативные характеристики объекта, позволяющие рассчитывать его физико–механические параметры (например, упругие модули E и G , пористость, плотность, и проч.) [4]. При использовании геометрического подхода были рассчитаны и минимальные размеры площадки d_m , позволяющие проводить локальные измерения v_R и ($\Delta V/V\%$). Пример $V(Z)$ –кривой для одного из сортов стали представлен на рисунке 1. Пример акустического изображения структуры стали демонстрируется на рисунке 2. По рассчитанному размеру зерна рассчитывали прочностные характеристики.

С использованием некоторых выводов теории упругости [5,6] может быть произведен расчет [4] значений других упруго–механических параметров:

$$v_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1-\gamma)}{(1+\gamma) \cdot (1-2\gamma)}}; \quad (3) \quad v_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1+\gamma)}}; \quad (4) \quad v_R = v_x \cdot \frac{0,87+1,12 \cdot \gamma}{1+\gamma}, \quad (5)$$

где γ – коэффициент Пуассона, ρ – плотность, E – эффективный модуль упругости, G – модуль сдвига исследуемого материала, v_l , v_s , v_R – соответственно скорости

продольных, поперечных и поверхностных акустических волн. После преобразований приведенных выражений получали уравнения (6 и 7) для определения значений упругих модулей изучаемых материалов:

$$E = v_R^2 \cdot \frac{2\rho \cdot (1+\gamma)^3}{(0,87+1,12\gamma)^2}; \quad (6) \quad G = v_R^2 \cdot \rho \cdot \left(\frac{1+\gamma}{0,87+1,12\gamma} \right)^2. \quad (7)$$

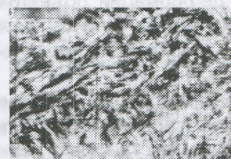
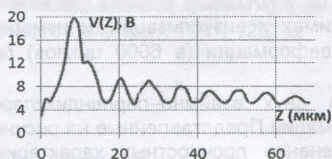


Рисунок 1 – Расчет скорости ПАВ по V(Z)– кривой для ст. 33ХН3МА, ($\Delta Z_N=13,22$ мкм, и $v_R=2930$ м/с)

Рисунок 2 – Акустическое изображение структуры мартенситной стали (ст.20Х13, Н₂О, масштаб: 24 мкм/дел., Z = - 14 мкм).

Используя известные параметры v_l и f , а также экспериментально найденные ΔZ_N , определяли значения v_R , и другие параметры, собранные в таблице 1. Затем, по формулам (6) и (7) рассчитывали значения упругих модулей (E и G). Экспериментально найденные величины практически во всех случаях совпали со значениями, приводимыми в литературных источниках, например [7], с точностью 0,5–2%.

Таблица 1 – Результаты модельных экспериментов на чистых металлах

№	Материал	Коэффициент Пуассона, (γ)	Плотность (ρ) 10^3 (кг/м ³)	Скорость продольных АВ (v_l) 10^3 (м/с)	Скорость поперечных АВ (v_s) 10^3 (м/с)	Скорость рэлеевских ПАВ (v_R) 10^3 (м/с)
1	Al	0,34	2,70	6,42	3,06	2,82
2	W	0,36	19,3	5,46	2,62	2,51
3	Cu	0,35	8,94	4,70	2,26	2,12
4	Ni	0,31	8,90	5,63	2,96	2,73
5	Ti	0,32	4,52	6,33	3,11	2,87
6	Ст.3	0,29	7,78	5,87	3,24	3,00
7	Ст.40Х	0,28	7,80	–	–	2,93
8	08Х18Н10Т	0,30	8,00	6,28	3,47	3,21
9	70ХГСА	0,29	7,81	–	–	2,78

Одним из важнейших параметров твердотельных образцов является размер зерна (d_3). На рисунке 3 представлены результаты стандартного определения условного предела текучести ($\sigma_{0,2}$) в зависимости от размера d_3 для одного из сортов низкоуглеродистой стали (14ХГС). Как следует из полученного графика, в интервале d_3 от 30 до 170 мкм наблюдается практически линейная зависимость $\sigma_{0,2}$ от размеров зерна. При характерном размере в 15 – 30 мкм $\sigma_{0,2}$ практически не меняется. В принципе, полученные зависимости $\sigma_{0,2}$ от d_3 хорошо описываются законом Холла–Петча

$$\sigma_{0,2} = \sigma_0 + k d_3^{-1/2} \quad (8)$$

где k и σ_0 – константы для данного материала. Проведенные эксперименты показали, что значение $\sigma_{0,2}$ надежно определяется АМД–методами (по акустическим изображениям или путем измерения акустических характеристик образцов). Пример

зависимости v_R от степени деформации представлен на рисунке 4. Были проведены модельные эксперименты на чистых металлах (медь, алюминий, никель), для которых получены соответствующие $V(Z)$ – кривые и рассчитаны значения скоростей ПАВ, их упругие модули (см. табл. 1).

При изменении степени деформации материала наблюдали изменение формы характерной кривой (рис.4 и 5), что позволило разработать метод оценки степени деформации металлических материалов по величине v_R и коэффициенту затухания АВ. После деформации объектов исследований по различным схемам (растяжение, кручение, изгиб) изучали их поверхность в режимах и визуализации, и измерения значений v_R . После специфи ческой изгибной деформации (в 6000 циклов) были прове-

дены эксперименты по измерению $\Delta V/V\%$ в двух взаимно–перпендикулярных направлениях относительно оси градиента деформации Представленные на рисунке 6 результаты демонстрируют периодическое изменение прочностных характеристик материала (до 15%) вдоль оси деформации. При этом в перпендикулярном направлении девиация не превышает 2–2,5%.

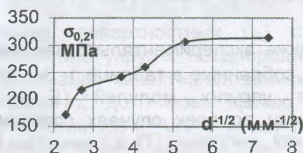


Рисунок 3 – Зависимость прочностных свойств ($\sigma_{0,2}$) стали от размера зерна (d_3)

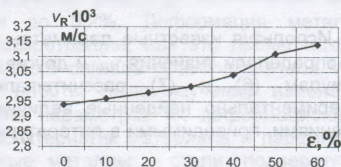


Рисунок 4 – Зависимости скорости ПАВ в стали от степени деформации ($\epsilon\%$)

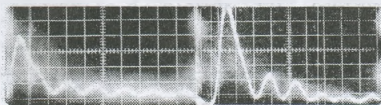


Рисунок 5 – Трансформация $V(Z)$ –кривой в стали 30ХГСМЛ ($v_R = 3,18 \cdot 10^3$ м/с, $\Delta Z_N = 14,68$ мкм, $(\Delta V/V\%)_{\max} = 37\%$, масштаб по вертикали 1 дел. = 0,25 В, по горизонтали – 1 дел. = 12,2 мкм) с различной степенью деформации ($\epsilon=0$ и $\epsilon=17\%$).

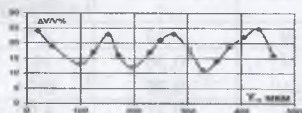


Рисунок 6 – Изменение поглощения АВ в образцах из 18ХНВА после деформационного воздействия

Таким образом, проведенными экспериментами установлено, что АМД–методы, благодаря высокому акустическому контрасту, позволяют визуализировать зеренную структуру материалов, выявлять возникающие в процессе деформации неоднородности и дефекты, различать состояния с различной степенью деформации. Получены корреляционные зависимости ряда характеристик образцов и параметров АВ.

Список литературы:

1. Kustov A.I //Proceed. of VIII Inter. Conf. «Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials», Science Series, II. Physics and Chemistry, vol. 72. 2004. p.203–215.
2. Кустов А.И., Мигель И.А. Выявление и характеристика дефектов твердотельных материалов с помощью акустических волн // Материаловедение., 2011., № 8., с. 31–42.
3. Мигель И.А., Кустов А.И. Разработка акустомикроскопических методов оценки влияния внешних воздействий на состояние поверхности материалов и их физические

свойства // Вестник Тамбовского университета, сер. «Естественные и технические науки». – Тамбов. 2010. Т.15. вып.3. часть I. 376 с. (с. 1062–1063)

4. Кустов А.И., Мигель И.А., Суходолов Б.Г. Изучение влияния различных видов термомеханической обработки на структуру и свойства сталей и сплавов // «Металловедение и термообработка металлов», 1998 – № 4 – с.29 –32.

5. И.А.Викторов. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981. 287с.

6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости // М., Наука – 1965 – 202 с.

7. Физические величины. Справочник под ред. И.С.Григорьева, Е.З.Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991, 1232 с.