

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ АМД-МЕТОДАМИ

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

Воронежский государственный педагогический университет, Россия

⁽¹⁾ ВУНЦ ВВС ВВА им. Профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина (Воронеж), Россия

E-mail: akvor@yandex.ru

⁽¹⁾ E-mail: vuaik@mail.ru

Значительный интерес в настоящее время в области материаловедения представляет прогнозирование предельных состояний (ПС) материалов. Если материал под влиянием внешних факторов необратимо изменяет параметры физико-механических свойств, и происходит это за счет активизации не являвшейся ранее существенной структурной характеристики, то говорят о переходе в *предельное состояние* [1]. Обычно ПС следует выявлять на ранних стадиях возникновения, особенно для конструкционных материалов, имеющих низкую сопротивляемость хрупкому разрушению. При этом, критериями наступления ПС могут быть и параметры локального деформационно-напряженного состояния, и концентрации внутренних напряжений, являющиеся тонкими структурночувствительными характеристиками. Достижение выбранными критериями критических значений способствует появлению ПС в локальных областях материалов. При разрушении материала определяющее значение играет процесс *локального разрушения* (ЛР). На наш взгляд, решить поставленные задачи, прежде всего в разработке способов определения количественных характеристик ПС, позволяют методы акустомикроскопической дефектоскопии [2,3].

Упруго-механические параметры материала изменяются как при вязком, так и при хрупком разрушении. В принципе этот процесс приводит к трансформации физических характеристик материалов, в том числе и характеристик акустических волн (АВ). По результатам измерений таких параметров АВ как уровень поглощения ($\Delta V/V\%$) и скорость (v_R), в объекте предполагалось определять состояние материала, оценивать его работоспособность по значениям измеренных величин. При этом, применение методов исследований, основанных на одних физических принципах, обеспечивало получение достоверных и обоснованных результатов. Сами исследования проводились на взаимосвязанных размерных уровнях (например, мезо-, микро- и нано-). Всем необходимым требованиям отвечали предложенные АМД-методы [1-3], обеспечивающие визуализацию и анализ структур, их характеризацию с помощью АВ.

Целью настоящей работы было изучение изменений характеристик АВ ($\Delta V/V\%$ и v_R) при изменении пластичности материалов, изучение параметров их деформационного состояния и анализ корреляционных связей характеристик материала и параметров АВ. Именно на основе полученных результатов предполагалось предложить набор количественных параметров, достоверно характеризующих предельные состояния материалов. В работе объектами изучения были стали и чистые металлы, которые подвергались различным внешним воздействиям.

В наших более ранних работах [3] было показано, что режим визуализации с относительным сканированием поверхности образца и акустической линзы позволяет получить акустическое изображение структуры объекта. При этом, изменяя расстояние (Z) линза-поверхность объекта, можно формировать изображения на различной глубине. Пример одного из полученных акустических изображений представлен на рис.1.

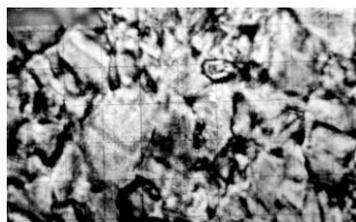


Рисунок 1 - Акустомикроскопическая визуализация структуры стали с деформацией 50% (шлиф перпендикулярен плоскости прокатки; H_2O , $Z = -14$ мкм, масштаб 40 мкм/дел.)

На акустических снимках различные по степени деформации и кристаллографической ориентации зерна (рис.1) за счет акустического контраста проявляются как отдельные образования. В ходе исследований создавались структуры с неоднородностями, поперечные размеры которых не превышали десятые доли микрометра. Их поверхности покрывались металлическими слоями (Cr , Al , Ni) толщиной до нескольких единиц микрометров. Экспериментально подтверждено, что САМ чувствителен к такого рода дефектам и позволяет гарантированно их визуализировать до глубин в несколько десятков микрометров.

Следующий этап исследований был связан с характеристикой областей, образовавшихся при деформационных воздействиях и выявлением зарождающихся при этом дефектов в материалах в конденсированном состоянии. Для решения этой задачи применялся метода $V(Z)$ -кривых, разработанный и успешно примененный нами ранее [1]. Измеряя экспериментально расстояние между максимумами (ΔZ_N) интерференционной кривой, характерного вида для каждого материала, рассчитывали значения скорости поверхностных акустических волн (ПАВ), чувствительную к параметрам ПС (1 и 2).

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

В приведенных выражениях v_R - скорость поверхностной акустической волны, v_l - скорость продольной волны в иммерсионной жидкости, f - рабочая частота САМ. Величина v_R , а также высота главного максимума $V(Z)$ -кривых – информативные характеристики объекта, позволяющие рассчитывать, например, упругие модули E и G , плотность, пористость. При наличии метода $V(Z)$ -кривых определить значения предела текучести $\sigma_{0,2}$ можно с использованием значений упругих модулей (3 и 4), которые рассчитываются на основе представлений, изложенных в [1]:

$$E = v_R^2 \cdot \frac{2\rho \cdot (1 + \gamma)^3}{(0,87 + 1,12\gamma)^2}; \quad (3) \quad G = v_R^2 \cdot \rho \cdot \left(\frac{1 + \gamma}{0,87 + 1,12\gamma}\right)^2. \quad (4),$$

где ρ -плотность материала образца, v_R скорость ПАВ в нем, γ коэффициент Пуассона. Оценка значений предела прочности проводилась в соответствии с известным выражением:

$$\sigma_{0,2} \cong \frac{G}{10^2 \cdot n \cdot \pi}. \quad (5)$$

Эта величина может быть рассчитана по результатам измерения скорости ПАВ из $V(Z)$ -кривых (рис.2). Полученные этим методом значения $\sigma_{0,2}$ совпали в пределах погрешности 5% с рассчитанными по методике расчета по размеру зерна. На рис.2 представлены $V(Z)$ -кривые для двух сортов стали, трансформация вида которых позволяла оценить критичность ПС в данной конкретной локальной области. Оценку параметров деформационного воздействия на характеристики материалов проводили как в режиме измерения скорости акустических волн (АВ) и уровня их затухания, так и в режиме акустомикроскопической визуализации. Был специально разработан алгоритм исследований, который позволяет рассчитывать физико-механические

параметры стали, или параметры ряда модельных материалов, с помощью АМД-методов [3] и с использованием стандартных решений оптимизационных задач.

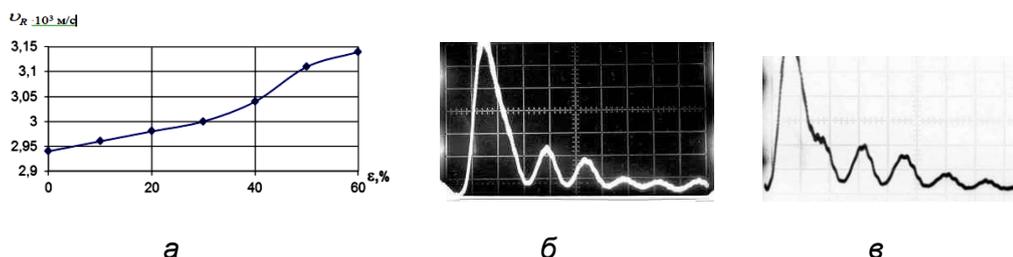


Рисунок 2 - а) Корреляционная зависимость v_R от степени деформации стали 30XГСМЛ
 б) Вид экспериментальной $V(Z)$ -кривой стали 30XГСМЛ; ($v_R = 3,18 \cdot 10^3$ м/с, $\Delta Z_N = 14,68$ мкм, $(\Delta V/V\%)_{\max} = 37\%$, масштаб по вертикали 1 дел.= 0,25 В, по горизонтали – 1 дел.=12,2 мкм.
 в) $V(Z)$ -кривая ст. 33XН3МА, ($\Delta Z_N=13,22$ мкм, и $v_R=2930$ м/с)

На следующем этапе исследований для нахождения базовых характеристик материала образца и детального анализа экспериментально полученной кривой были применены информационные технологии (ИТ). Они обеспечили расчет предела упру-

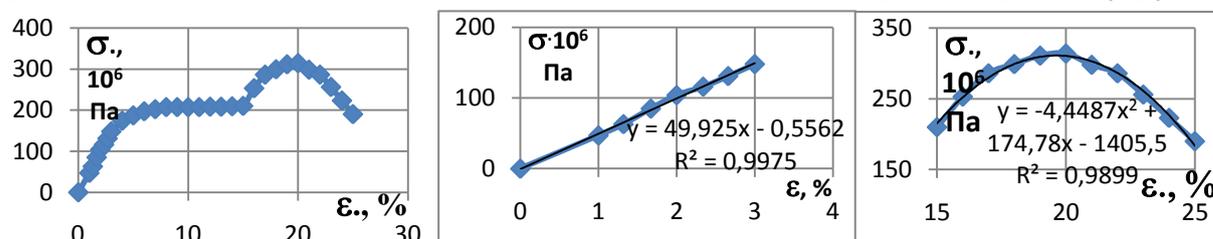


Рисунок 3 - Полученная традиционным методом экспериментальная кривая стали 3 (а). Экспериментальные зависимости $\sigma - \epsilon$ на участках 1 (область чисто упругих деформаций) (б) и 4 (область предела прочности) (в)

ги (σ_y), предела пропорциональности ($\sigma_{пл}$), условного предела текучести ($\sigma_{0,2}$), а также, предела текучести (σ_T) и предела прочности (σ_B). Были применены АМД-методы, которые обеспечили расчет значений скоростей ПАВ и уровень их затухания в стали 3. на основе полученных данных были рассчитаны упруго-механические характеристики материала. Из графика, представленного на рис.3б был определен угол наклона линейного участка кривой к оси деформаций (66°), а затем и его тангенс – 2,246). При этом, деформация в ($6,58 \cdot 10^{-2}$)% соответствует напряжению $\sigma_{пл}$ в (148 МПа). В сотнях ГПа отношение этих величин должно быть численно равно тангенсу угла наклона прямой упругости к оси деформаций, а также и модулю упругости (в нашем случае это 225 ГПа) [4]. Как показали эксперименты, это предположение подтвердилось с высокой точностью.

Список литературы

1. 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. "Естеств. и технич. науки". – Тамбов. 2010. Т.15. вып.3. часть I. 376 с. (с. 1062-1063)
2. Мигель И.А., Кустов А.И. А Оценка параметров анизотропии свойств металлических материалов с использованием АМД-методов // ФПСМ., Т.14., №1., 2017., с.44 - 51.
3. Кустов А.И., Мигель И.А. Определение параметров упрочнения или восстановления свойств поверхности материалов с помощью инновационных методов физического эксперимента – АМД-методов // ФПСМ, том 11, №4/2., 2014. – с. 592 -598.
4. Ирвин, Д.Ж. Основы теории роста трещин и разрушения / Д.Ж Ирвин, П.Парис // Разрушение. Т.3. / под ред. Г. Либовиц. – М.: Мир, 1976. – С. 17–66.