

УДК 621.01

## АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ, ПОДВЕРГАЕМЫХ СИЛОВОМУ НАГРУЖЕНИЮ

Мишакин В.В., Кассина Н.В., Гончар А.В., Наумов М.Ю.

В последние годы возрастает интерес к работам, относящимся к ультразвуковым исследованиям материалов, подвергающимся пластическому деформированию и усталостному разрушению. Наиболее перспективные разработки в этом направлении относятся не к обнаружению макротрещин, которые могут быть выявлены методами традиционной дефектоскопии, а к исследованиям структурных изменений и микроповрежденности при пластическом и упругопластическом деформировании материалов задолго до образования макротрещин.

Сложные преобразования структуры при деформировании сплавов, многообразии факторов, действующих на ультразвуковые характеристики, не дают возможности построить единую теорию, связывающую структурные изменения с параметрами распространения упругих волн.

Тем не менее, можно выделить основные факторы, влияющие на акустические параметры. Первый фактор – это изменение микронеоднородности при пластическом деформировании материалов, которое связано с изменением дислокационной структуры, плотности вакансий, накоплением микропор, микротрещин, изменением эффективных модулей упругости в локальных зонах из-за наличия микронапряжений и т. д. Все эти процессы приводят к изменению энергии рассеяния и поглощения ультразвуковых волн, а также скорости их распространения [1, 2].

Второй фактор связан с формированием кристаллографической текстуры деформации, которое приводит к анизотропии физических свойств, в том числе и акустических [3-4].

Для исследования влияния статического и усталостного нагружения на акустические параметры были использованы материалы: сталь 08пс, сталь 40 и сталь 09Г2С. Плоские образцы из стали 40 и стали 08пс имели размер 250×20×6 мм, из стали 09Г2С - 350×20×14 мм. Образцы деформировались при одноосном нагружении (см. рис.1(а)) со скоростью растяжения 0,2 мм/мин. Схема установки пьезокерамических преобразователей приведена на рис.1(а). Образец из стали 40 (предварительная пластическая деформация 10%) и один недеформированный образец из стали 08пс подвергались повторному статическому нагружению. Количество циклов до появления макротрещины составляло около 100 циклов. Схема циклических испытаний на изгиб представлена на рис.1(б).

Центральная частота ультразвуковых пьезокерамических преобразователей была около 4,6 МГц. Метод измерения – эхо-импульсный. Длительность ультразвуковых эхо-импульсов продольных волн была около 0,8 мкс и 0,4 мкс поперечных. Точность измерения скорости поперечных волн составляла около 3 м/с, точность измерения скорости продольных волн – 6 м/с. Точность измерения времени распространения была около 1 нс. Точность измерения параметра акустической анизотропии – не хуже

$1,5 \cdot 10^{-4}$ . Точность измерения затухания – 1 Нп/м. Частотно-зависимое затухание определялось с помощью выражения  $\alpha(\omega) = \ln[S_2(\omega)/|S_3(\omega)|]/2H$ , где  $S_2(\omega)$  – амплитудно-частотный спектр второго отраженного сигнала,  $S_3(\omega)$  – амплитудно-частотный спектр третьего отраженного сигнала,  $H$  – толщина образца.

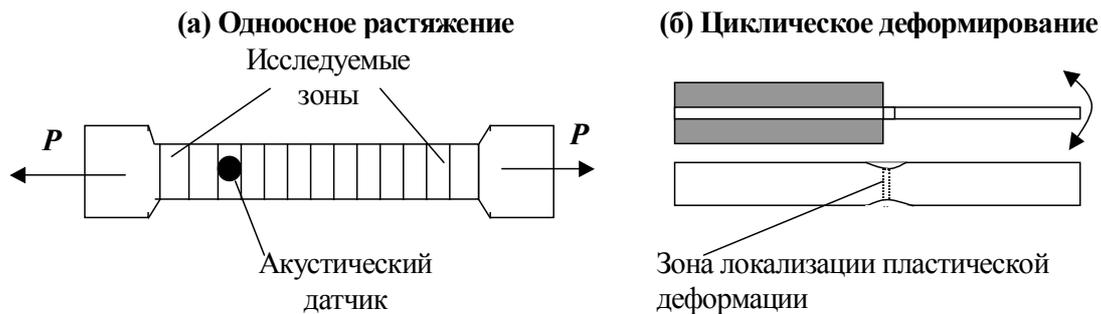


Рис.1. Схемы нагружения образцов

Для описания распространения волн в исследуемых материалах была использована теория распространения ультразвука в поликристаллических текстурированных сплавах [3-4], которыми являются листовые материалы и другие изделия проката - уголки, швеллеры, тавры, двутавры, широко используемые для изготовления силовых элементов в авиационной промышленности, в автомобилестроении, строительстве.

Одним из результатов работы [4] является то, что для ряда катанных поликристаллических сплавов на основе железа и алюминия сумма квадратов скоростей не зависит от характеристики его текстуры. Сумма квадратов скоростей выражается как

$$\rho \sum V_i^2 \equiv \rho(V_1^2 + V_2^2 + V_3^2) = K + \frac{10\mu}{3}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность;  $K$  и  $\mu$  – модуль всестороннего сжатия и модуль сдвига для изотропного материала соответственно;  $V_i$  – фазовая скорость продольной волны ( $i = 1$ ), распространяющейся перпендикулярно поверхности материала, и двух поперечных волн, распространяющихся в том же направлении и поляризованных вдоль ( $i = 2$ ) и поперек ( $i = 3$ ) направления растяжения.

Предполагая, что структурная поврежденность материала  $D$ , связанная с развитием микропор и микротрещин при его деформировании, выражается через изменение плотности как  $D \approx \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0}$  (где  $D = n\bar{a}^{-3}$ ,  $n$  – концентрация микронесплошностей,  $\bar{a}$  – средний размер микронесплошностей) и учитывая влияние разрыхления на упругие модули [5-6], выражение (1) можно записать в виде:

$$\sum v^2 = \left( K_0 + k_1 D + \frac{10(\mu_0 + k_2 D)}{3} \right) \frac{1}{\rho_0(1-D)}. \quad (2)$$

Зависимость модулей  $K$ ,  $\mu$  от структурной поврежденности имеет вид:

$$\Delta K = K - K_0 = k_1 D, \quad \Delta \mu = \mu - \mu_0 = k_2 D, \quad (3)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты.

Полагая  $D \ll 1$  и  $D = 0$  при пластической деформации  $\varepsilon = 0$ , зависимость между структурной поврежденностью и суммой квадратов скоростей приобретает вид:

$$D = K_D \Delta \left( \sum v^2 \right), \text{ где } K_D = \frac{\rho_0}{k_1 + K_0 + \frac{10}{3}(k_2 + \mu_0)} \quad (4)$$

Одним из параметров, используемых для оценки текстуры акустическим методом, является параметр  $A$ , линейно связанный с коэффициентом функции распределения ориентировок  $W_{420}$  кристаллов в поликристаллическом материале:

$$A = \frac{V_2^2 - V_3^2}{\sum V_i^2} = K_1 W_{420} = \frac{(\tau_2)^{-2} - (\tau_3)^{-2}}{\sum (\tau_i)^{-2}} \approx K_A \frac{2(\tau_3 - \tau_2)}{\tau_2 + \tau_3} = K_A A_1, \quad (5)$$

где  $K_A = \frac{2}{2 + k_v^2}$ ,  $k_v = \frac{\tau_3}{\tau_1}$ ,  $A_1 = \frac{2(\tau_3 - \tau_2)}{\tau_2 + \tau_3}$  - параметр акустической анизотропии,  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,

$\tau_3$  – время распространения продольных и поперечных упругих волн, поляризованных вдоль и поперек направления растяжения соответственно.

Зависимость структурной поврежденности, нормированной относительно максимального ее значения в зоне разрушения, от величины пластической деформации для материала 09Г2С представлены на рис. 2 (а). Зависимость величины акустической анизотропии от величины пластической деформации (материал 09Г2С) дана на рис. 2 (б).

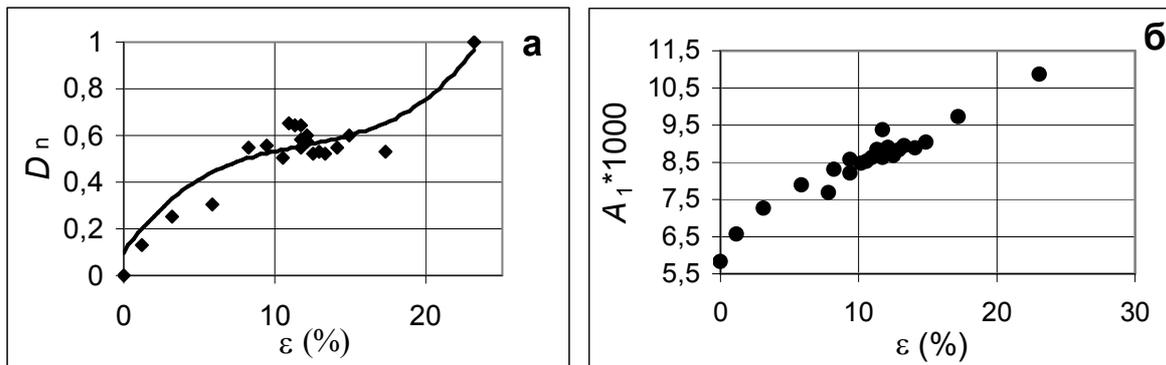


Рис.2. Зависимость структурной поврежденности, нормированной относительно максимального ее значения в зоне разрушения, от величины пластической деформации для материала (а), зависимость величины акустической анизотропии от величины пластической деформации (б), материал 09Г2С.

Таким образом, измерения скорости распространения продольных и поперечных волн позволяет найти величину структурной поврежденности материала на ранних этапах разрушения.

Деформационная теория накопления повреждений [7], предполагает, что общая поврежденность материала  $\psi$  складывается из поврежденности от циклического деформирования, циклической ползучести и статического разрушения. Циклическая ползучесть в условиях проведенного эксперимента (низкая температура и жесткий режим нагружения), практически отсутствовала. Представим зависимость накопленной

поврежденности от параметров  $\Delta K_\varphi$  и  $\Delta A$  при статическом и циклическом нагружении в виде выражения:

$$\psi = k_0^\psi \left[ (\Delta K_\varphi + k_1^\psi \Delta K_\varphi^2) - k_2^\psi (\Delta A + k_3 \Delta A^2) \right], \quad (6)$$

где  $\psi \approx \psi_{ст} + \psi_{цикл}$ , где  $\psi_{цикл} \approx \frac{N}{N^*}$ ,  $\psi_{ст} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ст}^*}$ ,  $N$  – количество произведенных циклов нагружения,  $N^*$  – предельное количество циклов нагружения до появления макротрещины,  $\varepsilon_{ст}^*$  – предельная деформация при статическом нагружении,  $0 \leq \psi \leq 1$ ,  $K_\varphi = \frac{d\alpha(f)}{df} - \frac{d\alpha_0(f)}{df}$ ,  $f$  – частота,  $\alpha, \alpha_0$  – текущее и начальное значение затухания,  $k_0^\psi, k_1^\psi, k_2^\psi, k_3^\psi$  – коэффициенты.

Величина коэффициентов, входящих в выражение (6), определяли в ходе обучающего эксперимента. Значение коэффициента  $k_0^\psi$  изменяется при переходе от статического нагружения к циклическому (для исследуемых материалов  $k_0^\psi(стат)/k_0^\psi(цикл) \approx 0,7$ ). Это в первую очередь связано с тем, что механизм повреждения и поврежденные объемы материала при циклическом деформировании на изгиб и одноосном растяжении достаточно сильно отличаются.

Первая группа слагаемых выражения (6) учитывает изменение частотнозависимого затухания из-за изменения микроповрежденности материала. Вторая группа слагаемых учитывает тот факт, что поворот кристаллов при формировании текстуры тоже приводит к изменению частотно-зависимого затухания. Формирование текстуры деформации в общем случае может быть не связано с накоплением поврежденности. Например, кристаллографическая текстура, а, следовательно, и упругая анизотропия при горячей прокатке листовых материалов изменяются в процессе деформирования, а плотность микротрещин не возрастает.

Как показал эксперимент, накопление односторонней деформации и изменения акустической анизотропии при циклическом деформировании происходит незначительно. Учитывая это, можно записать

$$\psi_{цикл} \approx k_0^\psi(цикл) (\Delta K_\varphi + k_1^\psi \Delta K_\varphi^2). \quad (7)$$

Связь изменения поврежденности при статическом и циклическом деформировании с изменением величины акустической анизотропии для материалов сталь 08пс и сталь 40 приведена на рис.3. Линии 1 и 2 – статическое нагружение сталей 40 и 08пс. Точка 3 – циклическое нагружение стали 08пс без предварительного пластического деформирования,  $\varepsilon = 0\%$ . Точка 4 – циклическое нагружение стали 40 после предварительного пластического деформирования при одноосном растяжении ( $\varepsilon = 10\%$ ).

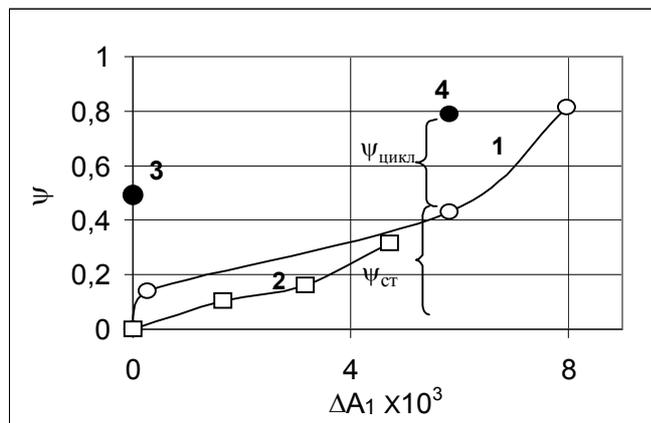


Рис. 3. Связь изменения поврежденности при статическом и циклическом деформировании с изменением величины акустической анизотропии для материалов сталь 08пс и сталь 40.

Наличие поврежденности, возникшей при циклическом нагружении, приводит к появлению точек выше линий 1 и 2. Это характеризуется различным воздействием циклического и статического нагружения на процесс формирования текстуры, накопления и распределения микродефектов. Поврежденность в результате циклического деформирования определяется разницей между общей поврежденностью и поврежденностью после предварительного пластического деформирования.

Таким образом, алгоритм разделения циклической составляющей поврежденности от поврежденности при статическом нагружении заключается в определении зависимости  $\psi(A_1)$  при статическом нагружении материала. По разнице между общей поврежденностью и поврежденностью, полученной в результате воздействия статических нагрузок, судят о величине поврежденности, полученной в результате циклического деформирования. Кривую изменения поврежденности при статических нагрузках получают в ходе предварительного эксперимента на тестовых образцах. Результаты работы могут быть использованы для раннего предсказания разрушения конструкций.

### Литература

1. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972. 308 с.
2. Савин Г.Н., Лукашев А. А., Лыско Е.М. Распространение упругих волн с микроструктурой // Прикладная механика. 1970. Т. 6. Вып. 7. С 48–52.
3. Sayers С.М. Ultrasonic velocities in anisotropic polycrystalline aggregates // Appl. Phys. 1982. V. 15. P. 2157–2167.
4. Allen, D., and Sayers, C. The Measurement of Residual Stress in Textured Steel Using an Ultrasonic Velocity Combinations Technique // Ultrasonics.- 1984. - V. 22.- P. 179-188.

5. Салганик Р.Л. Механика тел с большим числом трещин. // Механика твердого тела. - 1973. - № 4. - С. 149-158.
6. Вавакин А.С., Салганик Р.Л. Об эффективных характеристиках неоднородных сред с изолированными неоднородностями // Механика твердого тела. – 1975 . - № 3. - С. 65-76.
7. Кононов К.М., Гецов Л.Б. Критерий разрушения материалов при циклическом нагружении // Пробл. Прочности. 1984. № 2. С. 81–85.

*Нижегородский филиал Института машиноведения РАН, г. Н.Новгород*

*Поступила: 2.03.08.*