

УДК 539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ В ПОВРЕЖДЕННЫХ МАТЕРИАЛАХ

© 2011 г.

Е.А. Никитина

Нижегородский филиал Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

erf04@simm.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Предложен подход, позволяющий в рамках единой схемы и на основе принципов механики континуума записывать эволюционные уравнения накопления повреждений и динамики материала. Показано, что поврежденность материала привносит частотно-зависимое затухание и дисперсию фазовой скорости ультразвуковой акустической волны, что позволяет оценивать поврежденность акустическим методом. Получено кинетическое уравнение, анализ которого показывает, что нарастание поврежденности имеет экспоненциальный характер. Произведена оценка параметров системы, при которых накопление повреждений можно считать линейным.

Ключевые слова: поврежденность материала, акустическая волна, кинетическое уравнение, дисперсия, затухание.

Среди методов неразрушающего контроля при диагностике состояния длительно эксплуатируемых конструкций акустический метод отмечается как наиболее перспективный. Этот метод основан на использовании эффекта изменения скорости распространения упругих волн в зависимости от уровня напряженного состояния материала конструкции. Вместе с тем, одним из основных факторов, который также оказывает существенное влияние на скорость распространения упругой волны, является изменение структуры материала при его эксплуатации.

Исследуется влияние поврежденности материала на параметры упругих волн. Рассмотрим образец материала, выполненный в виде стержня, по которому может распространяться продольная акустическая волна. Обозначим через $u(x, t)$ перемещение частиц срединной линии стержня. Считаем, что стержень подвергается статическим или циклическим испытаниям и в его материале может накапливаться поврежденность. Для описания меры поврежденности введем функцию $\psi(x, t)$ [1, 2], характеризующую относительную плотность равномерно рассеянных в единице объема микродефектов. Этот параметр равен нулю, когда повреждений нет, и близок к единице в момент разрушения.

Динамика стержня с учетом поврежденности его материала описывается системой уравнений:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c_0^2 \left(1 + \frac{\alpha_0 \partial u}{E \partial x} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \beta_1 \frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + \alpha \psi = \beta_2 E \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2)$$

или эквивалентным этой системе уравнением относительно предельного перемещения:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \left(c_0^2 + \frac{\beta_1 \beta_2 E}{\alpha} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1}{\alpha} \frac{\partial^3 u}{\partial t^3} - \frac{c_0^2}{\alpha} \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} - \frac{c_0^2 \alpha_0}{E} \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{c_0^2 \alpha_0}{\alpha_0 E} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) = 0, \quad (3)$$

где $c_0 = \sqrt{E/\rho}$ – скорость, с которой распространялась бы продольная упругая волна в материале стержня, если в нем нет повреждений; E – модуль Юнга; ρ – плотность материала; α , β_1 , β_2 – константы, характеризующие поврежденность материала и связь циклических процессов и процессов накопления повреждений.

В [3] было показано, что эти константы могут быть вычислены через измеряемые параметры волнового процесса:

$$\alpha = \frac{K^{11}(\infty)\omega}{K^{11}(0)\sqrt{1 + K^{11}(\infty)/(c_0\omega)}}, \quad (4)$$

$$\beta_1 \beta_2 = \frac{c_0(K^{11}(\infty))^2}{EK^{11}(0)\sqrt{1 + K^{11}(\infty)/(c_0\omega)}},$$

где ω – круговая частота гармонической волны, $K^{11}(0)$, $K^{11}(\infty)$ – мнимые части волнового числа в

низкочастотном и высокочастотном диапазонах.

Решение системы уравнений (1)–(2) в виде бегущих гармонических волн приводит к дисперсионному уравнению. Поскольку это уравнение содержит комплексные коэффициенты, волна будет не только распространяться по стержню, но и затухать по мере распространения.

Получены соотношения, связывающие пространственные и временные масштабы продольной волны. Волновое число состоит из двух составляющих, характеризующих постоянную распространения и постоянную затухания волны. Решение уравнений позволило определить обе составляющие волнового числа. Получено уравнение, которое представляет собой кинетическое уравнение накопления повреждений. Его анализ показывает, что нарастание поврежденности имеет экспоненциальный характер. Установлено, что в низкочастотном диапазоне ($\omega \rightarrow 0$) затухание волны пропорционально квадрату частоты; в высокочастотном диапазоне ($\omega \rightarrow \infty$) затухание волны пропорционально первой степени частоты. Выведена зависимость для показателя экспоненты и показано, что лишь при некоторых значениях параметров этот процесс можно аппроксимировать линейной функцией.

Произведена численная оценка параметров

системы, при которых накопление повреждений можно считать линейным. Параметры модели материала, входящие в расчетные зависимости, могут быть получены из достаточно просто реализуемых экспериментов. Полученные зависимости могут быть использованы при решении практических задач диагностирования длительно эксплуатируемой конструкции с целью повышения точности обработки информации о напряженном состоянии, а также о степени поврежденности конструкционного материала.

Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ (грант №09-08-00827).

Список литературы

1. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. М.: Наука, 1974. 311 с.
2. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.
3. Ерофеев В.И., Никитина Е.А. Самосогласованная динамическая задача оценки поврежденности материала акустическим методом // Акустический журнал. 2010. Т. 56, №3. С. 554–557.
4. Ерофеев В.И., Никитина Е.А. Локализация волны деформации, распространяющейся в поврежденном материале // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. №6. С. 60–62.

INVESTIGATING THE PARAMETERS OF ACOUSTIC WAVE PROPAGATION IN DAMAGED MATERIALS

E.A. Nikitina

An approach is suggested that allows one to write evolution equations of damage accumulation and dynamics of the material within a single scheme and based on the principles of continuum mechanics. It is shown that the damaged material introduces frequency-dependent attenuation and dispersion of the phase velocity of ultrasonic acoustic waves, which makes it possible to assess damage using the acoustic method. The applied deformation field, in its turn, leads to the accumulation of damage. A kinetic equation is derived, whose analysis shows that the increase in damage is exponential. Parameters of the system for which damage accumulation can be assumed linear are assessed.

Keywords: material damage, acoustic wave, kinetic equation, dispersion, dissipation.