© С.Н. Толстопятов, И.Н. Молодцов, 2005

УДК 622.673.1:621.833.6

С.Н. Толстопятов, И.Н. Молодцов

ВОЗМОЖНОСТЬ КОНТРОЛЯ ОДНООСНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ ГОРНЫХ МАШИН МЕТОДОМ ЗАТУХАНИЯ УЛЬТРАЗВУКА

Семинар № 17

Совершенствование технологии добычи полезных природных ископаемых, их переработки и транспортировки характеризуется резким возрастанием нагрузок на рабочие органы машин и элементы конструкций, таких как, гидравлические стойки механизированных крепей, гидродомкраты подъема поворотных редукторов очистных и проходческих угольных комбайнов, вилки и проушины гидродомкратов и т.д., что требует обеспечения запаса прочности и надежности при одновременном снижении материалоемкости выпускаемых изделий.

Решение таких задач невозможно без неразрушающих методов контроля напряженно-деформированного состояния элементов конструкции во время эксплуатации. Одними из наиболее перспективных являются ультразвуковые методы, позволяющие находить однозначную связь между изменениями акустических характеристик материала и его напряженно-деформированным состоянием [1], [2].

Экспериментальные исследования [3], [4] показали, что относительное затухание ультразвуковых волн более чувствительно к изменению механического состояния образца, чем относительное изменение скорости распространения ультразвука, что открывает новые возможности в совершенствовании и дальнейшем развитии ультразвуковых методов определения напряжений и деформаций в деталях машин и механизмов, включая остаточные деформации и напряжения.

В имеющихся экспериментальных исследованиях наблюдается рост затухания ультразвука с ростом напряжений и деформаций в образце. Известные объяснение наблюдаемого эффекта, в основном, сводятся к установлению связи изменения структуры материала и распространения ультразвуковых колебаний в нем.

В настоящей работе на основе экспериментов авторов и других исследователей строится одномерная математическая модель сплошной среды, адекватно объясняющая результаты экспериментов. Приведены графики экспериментальных зависимостей и указано на возможность использования полученных результатов в практической деятельности.

Экспериментальные исследования

Методика экспериментов подробно изложена в [1], [5], [6]. При исследовании призматические стальные образцы (Сталь 20, Сталь 45) размерами 10x20x400 мм нагружались на разрывной машине МР-100 в условиях одноосного нагружения и в процессе нагружения измеряли с помощью ультразвукового дефектоскопа

ДУК-66ПМ амплитуду ультразвуковой волны, прошедшей путь L в образце. В качестве меры ослабления волны взят параметр $20\lg\frac{A}{A_0}$, где A_0 – амплитуда волны, прошедшей путь L в ненагруженном образце, A – амплитуда волны, прошедшей тот же путь в нагруженном образце. Нагрузка имела ступенчатый характер, т.е. при достижении некоторо-

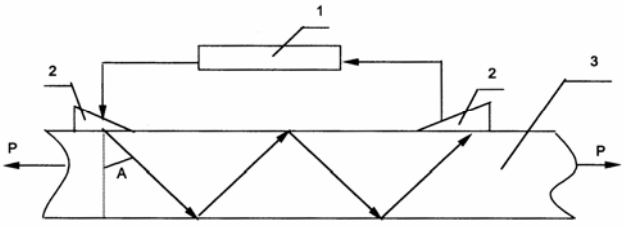

Рис. 1. Схема эксперимента: 1 - ДУК 66ПМ; 2 - ультразвуковые преобразователи; 3 - образец; 4 - путь ультразвуковой волны в образце; А - угол ввода уль тразвука; Р - растягивающее усилие.

го усилия P_i на машине МР-100, машина останавливалась, измерялась амплитуда A_i на аттенюаторе дефектоскопа, затем образец нагружался до следующего значения P_{i+1}, измерялась амплитуда A_{i+1} и т.д. Измерения проводились как при нагрузке, так и при разгрузке. Эксперименты проводились на частоте 2,5 МГц с помощью сдвиговых волн (вертикально поляризованная SV-волна). Угол призмы ультразвукового преобразователя 30º. Схема эксперимента показана на рис. 1. Одноосные растягивающие напряжения вычисляются по формуле $\sigma = \frac{P}{S_0}$, где P - растягивающая нагрузка, S_0 - первоначальная площадь сечения образца. Из приведенных данных видно, что с ростом растягивающих напряжений увеличивается относительное затухание ультразвука; после снятия нагрузки в образце остается «остаточное» затухание.

Относительное затухание ультразвука растет с увеличением одноосного растягивающего напряжения, причем в стадии упрочнения материала этот рост нелинейный. Это характерно для всех образцов. Эксперименты показывают принципиальную возможность определения растягивающих напряжений в работающем изделии по затуханию ультразвука. Для этого необходимо иметь эталонный образец из той же марки стали и так же термообработанный, как и сталь рабочего органа, испытывающего растягивающие напряжения. Затем, выбрав базу пробега волны L, измерить амплитуду ультразвуковых колебаний в рабочей (нагруженной) детали. По величине $20\lg\frac{A}{A_0}$ можно судить об уровне напряжений в рабочей детали. Предварительно необходимо построить тарировочный график по эталонному образцу на базе L. В общем случае находятся регрессионные кривые для разных марок сталей и разных значений L. Измерение абсолютных значений затухания использовать нельзя, т.к. оно зависит от множества факторов, выделить из которых $\{$ зависимость только от напряжения очень сложно и в производственных условиях вряд ли возможно.

Математическая модель

Основные причины затухания ультразвука – рассеяние и поглощение энергии ультразвуковых волн. Эксперименты показывают зависимость их затухания от уровня напряжений и деформаций. Поэтому имеет смысл в модели одноосного напряженно-деформированного состояния использовать систему уравнений:

$$\begin{cases} \dot{э} = f(э, \sigma, \dot{\sigma}) \\ \rho \dot{v} = \dfrac{\partial \sigma}{\partial x} \\ \dot{э} = \dfrac{\partial v}{\partial x} \end{cases} \qquad (1)$$

Здесь точка вверху означает производную по времени. В дальнейшем частные производные по другим переменным иногда будут обозначаться соответствующими индексами внизу, например, запись

$$\dot{F}_{\alpha\beta} \equiv \frac{\partial^3 F}{\partial t \partial \alpha \partial \beta}.$$

Из (1) следует эквивалентная система уравнений, связывающая напряжения и деформации

$$\begin{cases} \ddot{э} = f_э f + f_\sigma \dot{\sigma} + f_{\dot{\sigma}} \ddot{\sigma} \\ \rho \ddot{э} = \dfrac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2} \end{cases} \qquad (2)$$

Возьмем функцию $f(э, \sigma, \dot{\sigma})$ в виде

$\dot{э} = \frac{1}{E}\dot{\sigma} + \delta F(э, \sigma)$, где

$$F(э, \sigma) = \frac{\sigma}{\sigma_s + \frac{E'E}{E - E'}(э - \frac{\sigma}{E})} - 1 = \frac{\sigma}{\sigma_s + \gamma(Eэ - \sigma)} - 1 \quad ;$$

δ - множитель, имеющий размерность $\left[\frac{1}{c}\right]$, E' – касательный модуль; $\sigma_s = \sigma_{0,2}$.

Считаем, отражая известный экспериментальный факт об упругой скорости догрузочных волн, величины, характеризующие состояние тела в данный момент времени суммой соответствующих величин, характеризующих начальное деформированное состояние, и малых догрузочных возмущений. Все величины, относящиеся к начальному состоянию, будем отмечать индексом «нуль» внизу: σ_0, $э_0$ … Величины возмущений будем отмечать индексом звездочка $\sigma^*, э^*$. Величины, характеризующие состояние тела в данный момент, не будем отмечать никакими индексами.

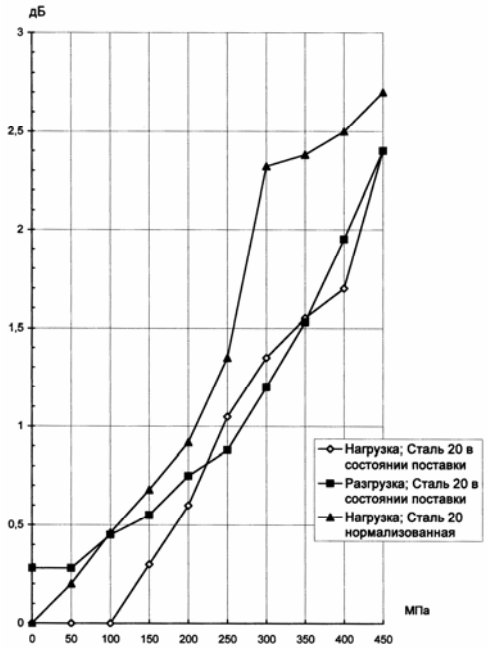

Рис. 2. Связь затухания ультразвука с одноосными растягивающими напряжениями

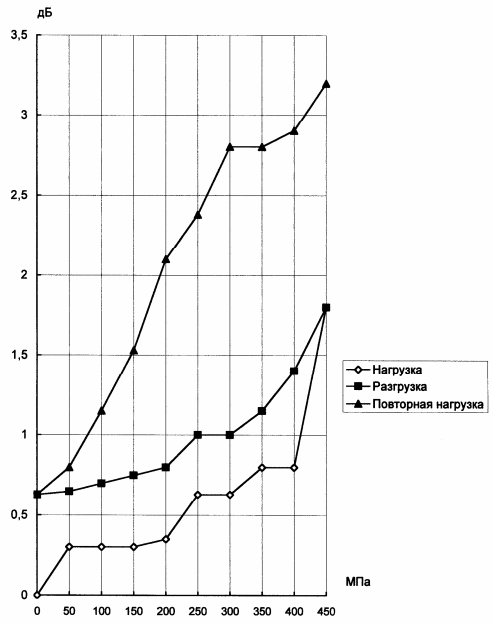

Рис. 3. Связь затухания ультразвука с одноосными растягивающими напряжениями. Материал - Сталь 45 в состоянии поставки

Амплитуды возмущений предполагаются малыми, поэтому их произведениями и квадратами пренебрегаем.

Имеем: $э = э_0 + э^*, \sigma = \sigma_0 + \sigma^*$, где σ^* и $Э^*$ - догрузочные напряжения и деформации, которые характеризуют быстрый процесс изменения основного (начального) квазистатического состояния.

Линеаризуем (2):

$$\ddot{э} = (f_{ээ}f + f_э^2 + f_{\sigma э}\dot{\sigma}_0 + f_{\dot{\sigma} э}\ddot{\sigma})э^* +$$

$$+\left(f_{э\sigma}f + f_э f_\sigma + f_{\sigma\sigma}\dot{\sigma} + f_{\dot{\sigma}\sigma}\ddot{\sigma}_0\right)\sigma^* +$$

$$(f_{э\dot{\sigma}}f + f_э f_{\dot{\sigma}} + f_{\dot{\sigma}\sigma}\dot{\sigma} + f_\sigma + f_{\dot{\sigma}\dot{\sigma}}\ddot{\sigma})\dot{\sigma}^* +$$

$$+ f_{\dot{\sigma}}\ddot{\sigma}^* = \theta э^* + \frac{\beta^2}{E}\sigma^* + \frac{2\alpha}{E}\dot{\sigma}^* + \frac{1}{E}\ddot{\sigma},$$

где обозначено

$\theta = \delta^2(F_{ээ}F + F_э^2)$;

$\beta^2 = E\delta^2(F_{э\sigma}F + F_э F)$; $\alpha = \frac{E}{2}\delta(F\frac{1}{E} + F_\sigma)$.

Исключая деформации, получим уравнения для догрузочных напряжений:

$$\frac{1}{\theta}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\left\{\frac{\partial^2\sigma^*}{\partial x^2} - \rho\frac{1}{E}\left(\frac{\partial^2\sigma^*}{\partial t^2} + 2\alpha\frac{\partial\sigma^*}{\partial t} + \beta^2\sigma^*\right)\right\} = \frac{\partial^2\sigma^*}{\partial x^2} \quad (3)$$

Используя диаграмму растяжения для образца из Стали 45: E =2·10^5 МПа; σ_T = 420 МПа; E' = 10^4 МПа; $Э_0$ =0,02; σ_0 = 650 МПа; $\gamma = \frac{1}{19}$;

Находим $\theta \cong 431\cdot\delta^2$; $\beta^2 \cong -7416\,\delta^2$; $\alpha \cong 168\,\delta$.

При вдвое большей деформации $Э$ =0,04, найдем, что $\alpha \cong 167\,\delta$. Коэффициент α в волновом уравнении (3) характеризует затухание волны. Причем из опытов следует рост α при возрастании $Э$. Это приводит к необходимости уточнения зависимости скорости пластической деформации от напряжений:

$F(э,\sigma) = \varphi(\sigma) F_1(э,\sigma)$.

Тогда $\dot{э} = \frac{1}{E}\dot{\sigma} + \delta\varphi(\sigma)F_1(э, \sigma)$,

где $F_1 = \frac{\sigma}{f_1(э_p)} - 1$; $э_p = э - \frac{\sigma}{E}$; $\sigma = f_1(э_p)$ - соответствует статической диаграмме растяжения.

В этом случае имеем:

$\alpha = \delta\frac{E}{2}(F_\alpha \frac{1}{E} + F_\sigma)_0 = \delta\frac{E}{2}(\frac{\varphi(\sigma)}{E}F_{1э} + \varphi_\sigma(\sigma)F_1 + \varphi(\sigma)F_{1э})_0 = \delta\frac{E}{2}\varphi(\sigma)(\frac{F_{1э}}{E} + F_{1\sigma})_0$, если точка «0» принадлежит диаграмме растяжения, где $\sigma = f_1(э_p) \Rightarrow F_1 = 0$. Поскольку

$F_{1э} = -\frac{\sigma}{f_1^2}\dot{f}_1$; $F_{1\sigma} = \frac{1}{f_1} + \frac{\sigma}{Ef_1^2}\dot{f}_1$;

$\frac{F_{1э}}{E} + F_{1\sigma} = -\frac{\dot{f}_1}{Ef_1^2} + \frac{1}{f_1} + \frac{\sigma\dot{f}_1}{Ef_1^2} = \frac{1}{f_1}$, то

окончательно получим:

$\alpha = \delta\frac{E}{2}\frac{\varphi(\sigma)}{\sigma}$, где значения $\varphi(\sigma)$ и σ берутся на диаграмме растяжения.

В эксперименте $\alpha(\sigma)$ - возрастающая функция, поэтому при ее линейной апроксимации достаточно положить $\varphi(\sigma) = A\sigma(\sigma - \sigma_s)$. Следовательно, по набору экспериментальных данных по затуханию ультразвука и диаграмме растяжения, можно корректно подобрать функцию $\varphi(\sigma)$.

Таким образом, математическая модель сплошной среды (1), (2) с функцией

$f = \dot{э} = \frac{1}{E}\dot{\sigma} + \delta\varphi(\sigma)\left[\frac{\sigma}{f_1(э_p)} - 1\right]$ адекватно описывает результаты экспериментов по связи затухания ультразвука с механическими характеристиками одноосного напряженно-деформированного состояния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бобренко В.М.* Ультразвуковые методы и устройства для контроля механических напряжений. – Дефектоскопия. 1983. №12. С. 8-14.
2. *Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуща О.И.* Введение в акустоупругость. – К.: Наукова думка. 1977. – 149 С.
3. *Максимов В.Н.* Изменение акустических характеристик чугунов при деформации. – Дефектоскопия. 1978. №2. С. 105-107.
4. *Рохлин Л.Л.* Акустические свойства легких сплавов. М.: Наука. 1974. – 135 С.
5. *Толстопятов С.Н.* К вопросу о связи затухания ультразвука с остаточными напряжениями. – Энергомашиностроение. 1987. №7. С. 20-21.
6. *Толстопятов С.Н.* Зависимость затухания ультразвука одноосного напряженно-деформированного состояния образца. – Энергомашиностроение. 1988. №2. С. 27-28.

Коротко об авторах

Толстопятов С.Н. – Белгородская государственная сельскохозяйственная академия, Белгород.
Молодцов И.Н. – Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова.