

# ИЗСЛЕДВАНИЯ НА НАПРЕГНАТОТО СЪСТОЯНИЕ НА МАТЕРИАЛИ ЧРЕЗ УЛТРАЗВУКОВИ ВЪЛНИ

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА ПРИ ПОМОЩИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН

INVESTIGATIONS OF THE STRESS STATE OF THE MATERIALS BY ULTRASONIC WAVES

Й. Иванова  
Институт по механика- БАН

**Abstract:** This work presents the results of nondestructive ultrasonic investigation of the mechanical stresses. The dependences between of ultrasonic surface waves' parameters and stress conditions of the bent materials are studied. Ultrasonic spectral analysis is applied to increase the accuracy of measurements.

**KEYWORDS:** BENDING, MECHANICAL STRESSES, ULTRASONIC SURFACE WAVES, STRESS EVALUATION, ULTRASONIC SPECTRAL ANALYSIS

## Въведение

Ултразвуковите методи за оценяване на напрежения се основават на изменението на скоростите на ултразвуковите вълни, разпространяващи се в твърди тела с напрежения, така нар. акустоеластичен ефект [4,5].

Изследванията, свързани със разпространението на повърхностни ултразвукови вълни на Релей в среди с механични напрежения [3-7] дават възможност за определяне на напрежения и физико-механичните свойства на повърхностните и подповърхностните слоеве на материалите.

Цел на изследването е да се намери връзка между параметри, получени чрез ултразвуков спектрален анализ и напрегнатото състояние на материали.

## Постановка на задачата

Метален лист от нисковъглеродна стомана с ширина  $b$ , дължина  $l$  и дебелина  $h$  е запънат и подложен на огъване по схема, показана на фиг.1. Нормалното напрежение  $\sigma$  при това натоварване е променливо както по напречното сечение на листа по направление  $z$ , така и по дължината на металния лист от мястото на запъване до точката на прилагане на силата. То се определя чрез зависимост (1) [1,2]. При огъване горната част на гредата над нулевата повърхност Оху е подложена на опън, а долната – на натиск. Нормалното напрежение е максимално в мястото на запъване, като силата  $P$  е ограничена така, че стойността  $\sigma_{\max}$  е по-малка от границата на провлачване  $\sigma_s$  на материала

$$(1) \quad \sigma(x, z) = \frac{M_y}{W_y} = \frac{M_y}{J_y} z = \frac{12Px}{bh^3} z$$

Където  $z$  е координатата по оста  $z$  от горната повърхност до нулевата линия,  $x$  е разстояние от местото на прилагане на силата  $P$  до участъка, в който се регистрират ултразвуковите вълни по дължината на металния лист,  $M_y$  е огъващия момент спрямо  $y$ ,  $W_y$  - съпротивителния момент,  $J_y$  - инерционния момент [1].

В работата се търси качествена зависимост между параметрите на механичното напрежение и ултразвуковите сигнали.

## Ултразвукови изследвания на напрежения

Оценката на повърхностни напрежения с повърхностни ултразвукови вълни е възможна поради това, че те са локализирани в слой с дебелина от една до две дължини на вълната [3]. Затрудненията при практическото им приложение е свързано с по-слабо изразения ефект на акустоеластичност,

което изисква апаратура с голяма точност. Съотношенията, които свързват изменението на скоростите и механичните напрежения за повърхностни вълни са представени подробно в [4,5] в зависимост от разпространението на вълните, тяхната поляризация и направлението на приложеното усилие. В случая повърхностната ултразвукова вълна се разпространява перпендикулярно към оста на натоварване и е поляризирана по дължината на материала и се описва с (2) [4].

$$(2) \quad \rho_0 C_R^2 = \mu \left( 1 + \sigma_{zz} \frac{\lambda + 2\mu + m + \frac{\lambda n}{4\mu}}{3\mu K_0} \right),$$

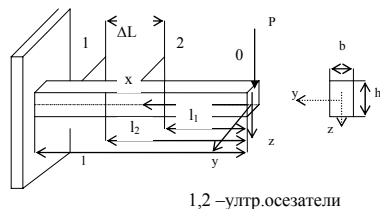
Където е  $\rho_0$  е плътността на материала преди прилагане на напрежения,  $\lambda, \mu$  са еластични константи (константи на Ламе),  $l, m, n$  са константи на Мурнаган,  $\sigma_{zz}$  е нормалното напрежение, което се променя по знак при опън и натиск,  $K_0$  – обменен модул [4]. Относителното изменение на скоростта на повърхностните вълни в материал, подложен на огъване се представя с формулата (3) [4,5]

$$(3) \quad dC_R = \frac{\left( \lambda + 2\mu + m + \frac{\lambda n}{4\mu} \right)}{6\mu K_0} \sigma_{zz} = \beta \sigma_{zz}$$

Коефициентът  $\beta$  се нарича акустоеластичен коефициент и е характерен за изпитвания материал и за вида на прилаганото усилие.

Проведени са измервания на скоростта на ултразвукова повърхностна вълна при огъване на метален лист с дебелина 3 mm със сила  $P$  до 70 N (фиг.1) и в различни участъци по дължината на рамото  $l=600$  mm. Пренебрегнати са влиянията на тангенциалните напрежения и градиента на нормалните напрежения по  $z$ .

Измерванията на скоростта на повърхностната вълна са направени с компютризиран ултразвуков апарат, състоящ се от генератор и приемник на ултразвукови сигнали и ултразвукова РС-карта, интегрирана в персонален компютър клас [9]. Ултразвуковите повърхностни вълни с работна честота 4 MHz се възбуждат чрез ъглов осезател с променлив ъгъл, при ъгъл на пречупване, близък до втория критичен ъгъл за границата плексиглас-стомана. Дължината на вълната е от порядъка на 0,75 mm. Дълбочината на проникване на повърхностните вълни е от порядъка на 1.7  $\lambda$ . Използва се метод на отражение [3,4,6].



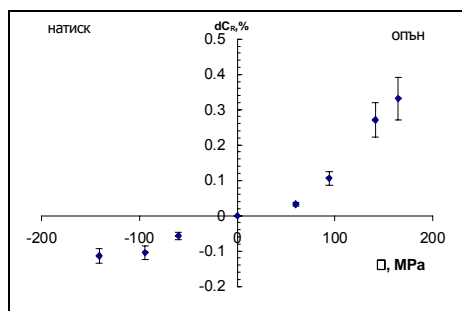
Фиг.1

Осезателят се поставя на разстояние  $l_1$  по дължината  $l$  (фиг.1) и се репозиционира с отместване  $\Delta L$ . Регистрират се и се записват ехо сигналите от ръба на изследвания образец до осезателя и времената на преминаване на ултразвуковите вълни. Средната скорост ( $C_R$ ) в участъка между позициите на осезателя се пресмята по зависимост:

$$(4) \quad C_R = \frac{L_2 - L_1}{\tau_2 - \tau_1} = \frac{\Delta L}{\Delta \tau}$$

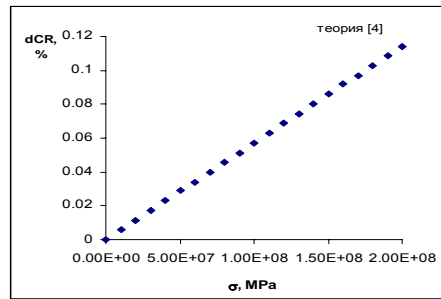
където  $L_1$  и  $L_2$  са акустичните пътища на ултразвуковите вълни ( $L_1 = 2l_1$ ,  $L_2 = 2l_2$ ),  $l_1$  и  $l_2$  са разстояния от центъра на осезателя до края на образца,  $\tau_1$  и  $\tau_2$  са времената на повърхностните вълни съответно при разстояния  $l_1$  и  $l_2$ . Времето на разпространение на регистрираните импулси се отчита по максимална стойност на обвивката на сигнала и се измерва с точност до 10 ns [9]. Скоростта на повърхностната вълна се измерва за всяко натоварване е от 0 до 70N. Относителното изменение на скоростта на повърхностните вълни  $dC_R$  при прилагане на товар  $P$  се определя  $dC_R = (C_{R_o} - C_R) / C_{R_o}$  [5],  $C_{R_o}$  и  $C_R$  са съответно скоростите без и при натоварване. Експериментите са проведени при едни и същи условия.

На фиг.2 е показано изменението на скоростта ( $dC_R$ ), получено експериментално върху горната опъната и долната натисната повърхност при максимални напрежения в близост до местото на запъване. При опън осезателите са разположени на горната повърхност, а при натиск – на срещуположната повърхност.



Фиг.2

Относителното изменение на скоростта  $dC_R$ , определено по (3) при максимално натоварване е от порядъка на 0.4%. На фиг. 3 са дадени пресметнатите стойности по [4] на  $dC_R$  на опъната горна част на металната греда при огъване. Разликите в стойностите на  $dC_R$  е поради използваните стойности на акустоеластичните коефициенти за въглеродна стомана [4]  $\lambda = 112.10^9$  GPa,  $\mu = 80.10^9$  GPa,  $l = -274.10^9$  GPa,  $m = -495.10^9$  GPa,  $n = -660.10^9$  GPa,  $\rho = 7890$  kg/m<sup>3</sup>



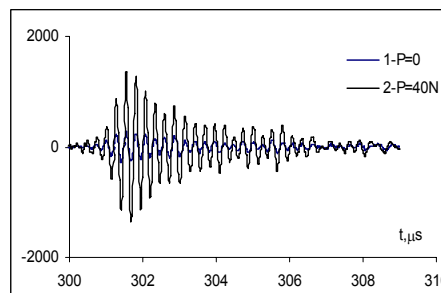
Фиг.3

### Обработка на сигналите, получени при разпространение на ултразвуковите повърхностни вълни при натоварване

В работата се търси връзка между параметрите, получени чрез спектрален анализ на сигналите и напрегнатото състояние на материал. Обработват се сигнали от повърхностни ултразвукови вълни по дължината на метална греда при различни натоварвания.

Регистрираните сигнали са обработени по методика, изложена в [8]. Методиката включва изравняване и изглаждане на сигналите, намиране на фурие-образите и параметрите на спектрите (реалната и имагинерната части, съответно фазите и амплитудите). За оценяване на различията между сигналите без натоварване и с натоварване се използва крос спектрален анализ [11,12]. Той дава възможност да се намират корелации между сигнали, получени при едно и също разстояние и отместени по времето сигнали, и да се изследват фазовите разлики [12,13].

На фиг.4 са показани в прозорец от време обработени сигнали от ултразвукови вълни от един материал, регистрирани на разстояние 20 cm от мястото на запъване и натоварване  $P=0,40$  N. Сигналите са изгладени и филтрирани. Наблюдава се промяна на сигналите при различните натоварвания. Намерени се фурие образи на сигналите.



Фиг.4

Комплексният честотен спектър на сигнала  $x(t)$  се получава след преобразование на Фурие

$$(5) \quad G(f) = \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) e^{-ift} dt = S(f) e^{-i\phi(f)}, \quad \text{където } S(f) \text{ е амплитудният честотен спектър}$$

$$(6) \quad S(f) = |G(f)| = \sqrt{[\text{Re} G(f)]^2 + [\text{Im} G(f)]^2}$$

Фазовият честотен спектър се представя със зависимост

$$(7) \quad \phi(f) = \arg G(f) = \text{arctg} \left( \frac{\text{Im} G(f)}{\text{Re} G(f)} \right),$$

$$\text{Im}(G(f)) = \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) \sin \omega t dt, \quad \text{Re}(G(f)) = \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) \cos \omega t dt,$$

$\omega$  - кръгова честота.

Енергията на сигнала се представя във вида (8) [14]:

$$(8) \quad E_i = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} |S(f)_i|^2 df = \int_0^T x^2(t)_i dt, \quad \text{където } x(t)_i \text{ е}$$

съответният ултразвуков ехо сигнал в интервал от време  $T$ .

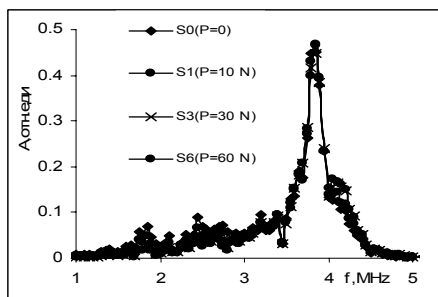
На Фиг. 5 са показани спектри на сигналите, получени при натоварване  $P_i$ ,  $i=0, 10, 40, 60$  N. Спектрите са нормирани относно  $G(f) = G(f)/E$ . Приети се следните означения:  $S(f)_{(P=0)} = S_0$ ,  $S(f)_{(P=P_i)} = S_i$ .

С нарастване на натоварването намаляват нискочестотните и се увеличават високочестотните съставки на спектрите. Тези ефекти са по-добре изразени на фиг.6, където са представени разликите на модулите на спектрите ( $S_i$ ) на сигналите и спектъра на ненаатоварения материал ( $S_0$ ).

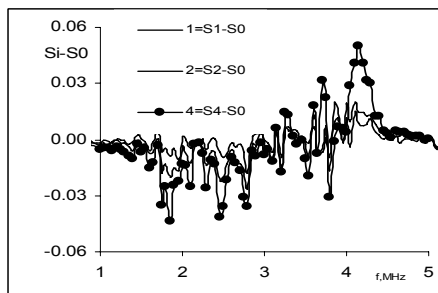
Влиянието на натоварването върху спектрите се оценява чрез въвеждане на метрика [14]. Разстоянието между функциите  $S_i(f)$  и  $S_o(f)$  в честотния диапазон 1 до 5 MHz [14] се изразява със зависимостта:

$$(9) \quad d(S_i(f); S_o(f)) = \left( \sum (S_i(f) - S_o(f))^2 \right)^{1/2},$$

където индексът на  $S_i$  се отнася до различните натоварвания от 10 до 70N,  $i=1,2,3,\dots,7$ .  $S_o$  е спектърът на сигнала без натоварване.

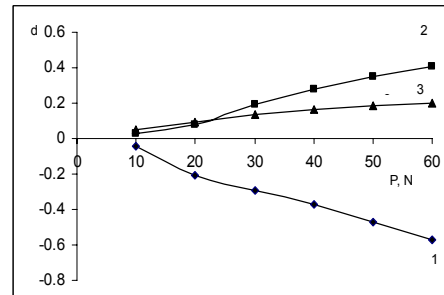


Фиг.5



Фиг.6

На фиг. 7 са дадени различимостите между  $(S_i(f); S_o(f))$  в зависимост от натоварването за случаите, показани съответно на фиг.6. С 1 е означена сума от разликите  $\sum (S_i(f) - S_o(f))$ ; с 2-  $\sum (S_i(f) - S_o(f))^2$  и с 3 е дадено разстоянието  $d(S_i(f); S_o(f))$ . Намаляването на стойностите на крива 1 с увеличаване на натоварването потвърждава увеличаването на високочестотните съставки в спектрите при натоварване. Мярка за различимостта между спектрите са разстоянията, определени по (9) и показани с крива 3.



Фиг.7

За оценка на взаимната връзка между спектралните компоненти на два сигнала се използва крос спектралната плътност или крос спектър [11].

Крос спектърът на два сигнала  $x(t)$  и  $y(t)$  се определя по зависимости (10) [11]

$$(10) \quad CS_{xy}(f) = F[x^*(t)y(t+\tau)] = S_x^*(f)S_y(f),$$

където  $S_x(f)$  е Фурие образът на  $x(t)$ ,  $S_x^*(f)$  е комплексно спрегнатия на  $S_x(f)$ , а  $S_y(f)$  е съответно Фурие образ на  $y(t)$ .

$$(11) \quad CS_{xy}(f) = CO(f) + iQ(f) = |CS_{xy}| \exp \{i\Phi_x\},$$

където  $CO(f)$  е реалната част,  $Q(f)$  е имагинерната част, а  $\Phi$  е фазата на кросспектралната функция.

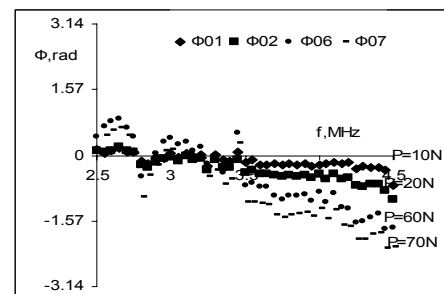
Фазата на кросспектъра  $CS(f)$  определя фазовите разлики между изследваните сигнали в определения честотен диапазон.

$$(12) \quad \Phi(f) = \arctg \left( \frac{Im(CS(f))}{Re(CS(f))} \right)$$

Според [13] наклонът на зависимостта фаза-честота дава възможност да се определи времето за изменение на груповата скорост на вълните, така нар. "group transit time".

$$(13) \quad \tau_\Phi(f) = \frac{d\Phi(f)}{df}$$

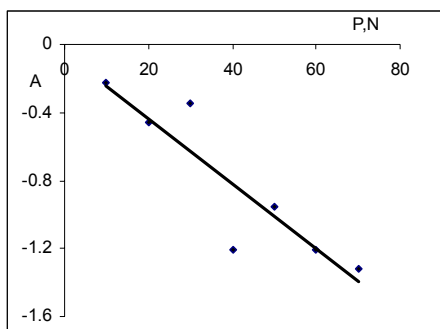
За сравняване на ултразвукови сигнали при различно натоварване се използва следната процедура. Намират се кросспектралните функции на сигналите, като спектъра на сигнала от ненаатоварения образец  $x_0(t)$  се корелира със спектрите на сигналите от натоварения с различен товар  $y_P(t)$  по (10). Фазите на кросспектрите се определят по (12). На фиг. 8 са показани зависимости на пресметнатите фази в честотната област от 2.5 до 5 MHz. Тук означенията са  $\Phi 0_i$ , където  $i$  е 1,2...7, и съответстват на натоварване 0 ...70 N. Влиянието на механичните напрежения се изразява с увеличаване на наклона на зависимостите. В честотния диапазон до 5 MHz измененията на фазите на кросспектрите на сигналите се апроксимират с линейни зависимости.



Фиг.8

Като информативен параметър може да се използва наклонът, определен по (14) и показан на фиг. 9 за различните натоварвания. Коефициентът  $A$  показва как се изменя фазовия ъгъл с изменението на честота.

$$(14) \quad \Phi(f) = A(f - f_o)$$



Фиг.9

### Заклучение

Проведените изследвания показват възможностите на ултразвуковия метод и на наличната ултразвукова техника да оценят акустичните свойства на еластично деформирани среди. Регистрирани са малките изменения в скоростите на повърхностните вълни при прилагане на натоварвания, помалки от границата на провлачване на материал.

Получените резултати съвпадат качествено с резултати от моделното изследване в [7]. Използването на спектралния анализ е подходящ за ултразвукови изследвания на напрежения. Механичните напрежения променят формата и спектрите на ултразвуковите сигнали. За разпознаване на различните натоварвания се препоръчва обработка на сигнала и анализирането на фазата на взаимния спектър (кроспектъра).

Работата е изпълнена по Договор 83/15.05.2009 със СУ"Кл. Охридски"

### Литература

1. Кисьов В. , Съпротивление на материалите, Техника,С., 1978.
2. Физически величини, Справочник, М., Атомиздат,1991.
3. Викторов И.А., Физические основы применения ультразвуковые волн Рэлея и Лэмба в технике, М., Наука, 1966, 168.
4. Неразрушающий контроль , Том 4 , Справочник в 7 томах под редакцией чл.-корр. РАН В.В. Клюева.

5. Бобренко В.М., М.С. Вангели, А. Н. Куценко, Акустические методы контроля напряженного состояния материала деталей машин, Кишинев, Штиинца, 1981.
6. Иванова Й., Г. Телбизов, Възможности за оценка на напрежения при огъване с използване на ултразвукови повърхностни вълни, Научни изв. на НТСМ (*ISSN 1310-3946*), Сборник XXIII Бълг. Конф. с межд. участие „Дни на безразрушителния контрол'2008", год. XV, № 2 (105), стр. 185 -190 (2008).
7. Парталин Т., И. Миховски, Й. Иванова, Разпространение на ултразвукови повърхностни вълни в материали подложени на огъване, Нац. Конф. „Металознание и Нови Материали'2008" 4-5.12.2008, Институт по металознание-БАН, София (2008).
8. Иванова Й., Парталин Т., Приложение на методи за обработка на сигнали от ултразвукови повърхностни вълни при изследване на индукционно закалени материали, Дефектоскопия'2007, XXII Нац. конференция с межд. участие, 11-15 юни 2007, Созопол, стр. 363-374 (2007).
9. Guide to OPKUD and OPBOX- ultrasonic testing units-technical data , <http://www.optel.pl>.
10. Иванов Р, Цифрова обработка на едномерни сигнали, Габрово, 1999.
11. Hartmann D., Cross Spectrum Analysis, ATM 552 Notes, Section 6c, p.157, Internet.
12. Zywicki D., Advanced signal processing methods applied to engineering analysis of seismic surface waves, PhD Dissertation, Georgia Institute of Technology, 1999.
13. Petersen G. Notes on ultrasonic phase and group velocity measurements, RITEC Inc, Internet, Web:RitecInc.com.
14. Глухчев Г., П. Венков, Д. Мутафов, М. Янчева, Елементи на теорията за разпознаване на образи, Изд.БАН, С., 1982.