

УДК 534.08

## КОНТРОЛЬ НАЯВНОСТІ ТРІЩИН В КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ НА ОСНОВІ ЕФЕКТУ ЗМІНИ ШВИДКОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ АКУСТИЧНОЇ ХВИЛІ

Лісовець С. М., Печенюк К. Л.

Київський національний університет технологій та дизайну

*Розглянуто неруйнівний акустичний контроль наявності тріщин в конструкційних матеріалах, зокрема, в бронзі олов'яній БрОФ6,5-0,15. Показано, що вимірювання амплітудно-залежної зміни швидкості розповсюдження акустичної хвилі дозволяє ефективно контролювати кількість або розміри тріщин в цьому матеріалі.*

**Ключові слова:** акустична хвиля, вищі гармоніки, квадратична нелінійність, мікронеоднорідне середовище, нелінійний ефект, структурна нелінійність

Відомо, що теорія акустичних хвиль скінченої амплітуди має досить давню історію. Ще в 1808 р. Пуассон, після аналізу рівнянь гідродинаміки у формі Ейлера, отримав рівняння розповсюдження акустичної хвилі, з якого виходило, що при розповсюдженні форма хвилі змінюється і відхиляється від синусоїдальної – таким чином, в спектрі хвилі спостерігаються вищі гармоніки. В 1920-1930 р.р. П. В. Бриджменом було встановлено, що в твердих тілах внаслідок зміни тиску змінювалася швидкість розповсюдження в них акустичних хвиль, що приводило до появи нелінійного акустичного ефекту зміни швидкості акустичної хвилі в залежності від зовнішніх механічних навантажень. Дуже важливу роль в дослідженнях нелінійних акустичних властивостей твердих тіл здійснили роботи Л. Д. Ландау та Ю. Б. Румера, в яких було введено додаткові модулі пружності третього порядку, які враховують відхилення від закону Гука. Починаючи з 1960 р. Красильниковим В. О. із співробітниками вперше спостерігалася генерація гармонік в твердих тілах [1].

Один з найважливіших висновків цих робіт полягав в тому, що поряд із геометричною нелінійністю та фізичною нелінійністю в твердих тілах є структурна нелінійність, яка викликається різного роду дефектами і неоднорідностями структури твердих тіл.

Роботи по дослідженню нелінійних акустичних ефектів в твердих тілах інтенсивно проводяться і в наш час – зокрема, досліджуються ефекти впливу структурної неоднорідності на швидкість і поглинання акустичних хвиль.

### Постановка завдання

Традиційно опис розповсюдження і взаємодії акустичних хвиль в різних твердотільних середовищах проводиться, в основному, в рамках класичної 5-константної або 9-константної теорії пружності [2, 3]. Вона визначає нелінійну залежність відповідно в квадратичному або кубічному наближенні між тензором пружних напружень  $\sigma_{ij}$  і тензором деформацій  $\varepsilon_{ij}$ . Для лінійного випадку, тобто випадку розповсюдження тільки в одному напрямку поздовжньої акустичної хвилі, ця залежність має вигляд

$$\sigma(\varepsilon) = E \left( \varepsilon - \frac{\gamma}{2} \varepsilon^2 + \dots \right) \quad (1)$$

де  $E$  – модуль пружності,  $E = \left. \frac{\partial \sigma(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \right|_{\varepsilon=0}$ ;  $\gamma$  – параметр квадратичної нелінійності,

$$\gamma = - \left. \frac{1}{E} \frac{\partial^2 \sigma(\varepsilon)}{\partial \varepsilon^2} \right|_{\varepsilon=0} \quad \text{та} \quad |\gamma \varepsilon| \ll 1.$$

Для однорідних твердих тіл така нелінійність (1) обумовлена залежністю міжмолекулярних сил від зсуву молекул, при цьому параметр квадратичної нелінійності  $\gamma$  є досить малим і не перевищує 10. Для опису проходження акустичної хвилі через структурно-неоднорідні середовища, до яких можна віднести і певні конструкційні матеріали, такий підхід не годиться. Це пов'язано з тим, що на теперішній час достовірно встановлено, що наявність в твердих тілах тріщин суттєво змінює лінійні і нелінійні акустичні властивості таких твердих тіл (в тому числі і конструкційних матеріалів) [4].

Рівняння стану (1) таких середовищ відповідають типу і кількості дефектів, які ними утримуються, і зазвичай є неаналітичними (тобто негладкими і недиференційованими). Наприклад, наявність в твердому тілі тріщин може привести до його різномодульності – різним модулям пружності при стисканні і розтягненні, а зернена структура матеріалу може змінити ступінь нелінійності рівняння стану з цілого числа 2 (як в п'ятиконстантній теорії пружності) на дрібне число 3/2 [5]. А одновимірні дефекти кристалічної решітки (дислокації) можуть привести до гістерезисної (тобто неоднозначної) залежності  $\sigma(\varepsilon)$  [6]. При цьому, зазвичай, ефективний параметр нелінійності мікронеоднорідних середовищ на 3... порядки перевищує відповідний параметр однорідних середовищ і матеріалів.

В зв'язку з цим характер нелінійних ефектів при розповсюдженні і взаємодії пружних хвиль в різних мікронеоднорідних середовищах (конструкційних матеріалах) є, взагалі, не тільки кількісно, але і якісно різним, що можна використовувати для їх діагностики і неруйнівного контролю.

Наявність тріщин в конструкційних матеріалах суттєво впливає на їх міцнісні характеристики у порівнянні із ідеальними кристалами і однорідними аморфними матеріалами [4]. При значній концентрації тріщин лінійні пружні модулі конструкційних матеріалів можуть бути помітно занижені. Однак, при малій концентрації тріщин пружність матеріалу остається практично незмінною, в той час як поглинання і зміна швидкості акустичної хвилі та деякі інші нелінійні властивості можуть вже суттєво змінитися.

Вважається, що всі ці прояви акустичної нелінійності пов'язані із відносною «м'якістю» тріщин, хоча ряд суттєвих питань і дотепер остається відкритим. Також вважається, що при прикладенні розтягуючої механічної напруги тріщини відносно легко розкриваються, а при стискаючій механічній нарузі – закриваються, так що при стисканні матеріал веде себе майже так, як суцільний.

Багато з моделей тріщин узгоджено передбачають, що тріщина може бути практично повністю закрита при створенні в конструкційному матеріалі середньої деформації стискання, яка приблизно дорівнює співвідношенню  $\lambda$  :

$$\lambda = \frac{d}{L}, \quad (2)$$

де  $d$  – характерне значення розкриття («товщини») тріщини;  $L$  – характерне значення діаметра тріщини.

Типові значення цього співвідношення  $\lambda$  для тріщин (наприклад, в гірських породах) складають  $10^{-4} \dots 10^{-3}$ .

### **Результати досліджень**

Напевно відомо, що існують взаємні зв'язки між наявністю тріщин в конструкційних матеріалах і параметрами акустичної хвилі, яка є зондуючою для цих матеріалів [4]. Для виявлення таких зв'язків пропонується застосовувати методи нелінійної акустики і, зокрема, зондування конструкційних матеріалів пружною поздовжньою хвилею в вигляді пакетів пружних коливань із жорстко заданим співвідношенням амплітуд (див. рисунок). Таке зондування виконується в імпульсному режимі, який полягає в поперемінному випромінненні в матеріал спочатку більшого

пакету пружних коливань (при цьому спостерігається амплітудно-залежна зміна швидкості розповсюдження акустичної хвилі), а потім меншого пакету пружних коливань (при цьому явище амплітудно-залежної зміни швидкості розповсюдження акустичної хвилі відсутнє), потім знову більшого пакету пружних коливань і так далі.

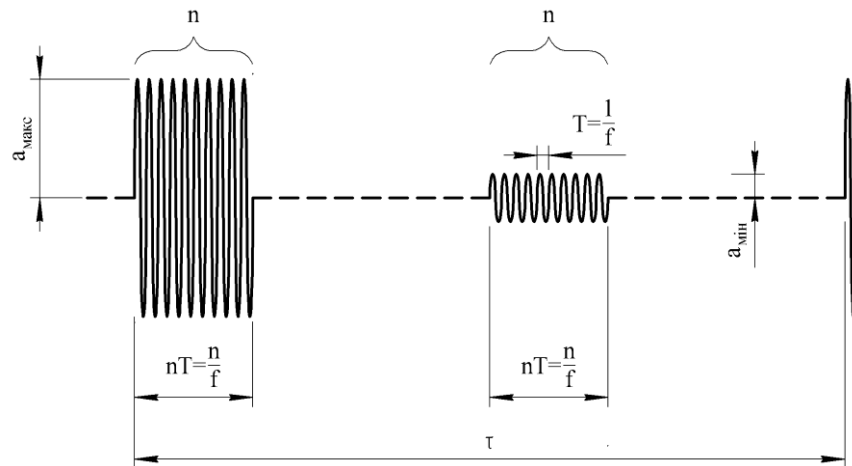


Рисунок. Зондування конструкційного матеріалу пакетами пружних коливань

Таким чином, наявність тріщин в конструкційних матеріалах приводить до відносної зміни  $\Delta c/c$  швидкості розповсюдження акустичної хвилі, причому взаємний зв'язок між цими двома параметрами може мати досить складний характер. Це, в основному, пов'язано з тим, що на результат вимірювання впливають різні додаткові параметри, зокрема, температура  $T$  конструкційного матеріалу і амплітуда  $\epsilon_{\text{макс}}$  акустичної хвилі. Тому в процесі дослідження необхідно контролювати як параметри конструкційного матеріалу (наприклад, кількість  $n_{\text{тр}}$  тріщин в одиниці об'єму і  $T$ ), так і параметри акустичної хвилі ( $\epsilon_{\text{макс}}$  та  $\Delta c/c$ ).

Для обробки результатів контролю пропонується застосовувати повний багатофакторний експеримент. А перевірку адекватності здійснювати згідно з F-критерієм (критерієм Фішера). В результаті такої обробки з'являється можливість створення метрологічного «паспорту» для певного виробу з конструкційного матеріалу. Згідно з цим «паспортом» на основі вимірювання  $\Delta c/c$  при відомих значеннях  $\epsilon_{\text{макс}}$  та  $T$  можна буде визначити кількість  $n_{\text{тр}}$  тріщин в одиниці об'єму (або, наприклад, середній розмір  $l_{\text{тр}}$  тріщин в одиниці об'єму). Пропонується застосовувати плани першого порядку, які мають загальний вигляд

$$\Delta c/c = \alpha_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} \alpha_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} \alpha_{ij} x_i x_j, \quad (3)$$

де  $\alpha_i$ ,  $\alpha_{ij}$  – коефіцієнти плану;  $k$  – кількість кодованих вхідних факторів,  $k = 3$ ;  $x_i$ ,  $x_j$  – кодовані вхідні фактори (перший –  $n_{TP}$  або  $I_{TP}$ , другий –  $\varepsilon_{\max}$ , третій –  $T$ ).

Після побудови такого плану першого порядку (3) виконується зворотнє перетворення з метою отримання явної залежності в вигляді  $n_{TP} = f(\Delta c/c, \varepsilon_m, T)$  або  $I_{TP} = f(\Delta c/c, \varepsilon_m, T)$ . Внаслідок складності зв'язків між наявністю тріщин в конструкційних матеріалах і параметрами акустичної хвилі плани першого порядку (3) досить часто згідно з F-критерієм виявляються неадекватними. При їх неадекватності пропонується застосовувати більш складні плани другого порядку, які мають загальний вигляд

$$\Delta c/c = \alpha_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} \alpha_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} \alpha_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq k} \alpha_{ii} x_i^2, \quad (4)$$

де  $\alpha_{ii}$  – додаткові коефіцієнти плану.

При цьому бажано застосовувати саме симетричні композиційні ортогональні плани, які дозволяють оцінювати коефіцієнти плану незалежно один від одного. Це дозволяє розташовувати всі досліді симетрично відносно центра (основного рівня) плану, а сам план другого порядку отримувати шляхом побудови плану першого порядку із застосуванням певної кількості спеціальним чином розташованих «зіркових» точок. Для проведення неруйнівного акустичного контролю наявності тріщин в конструкційних матеріалах було проведено дослідження з використанням бронзи олов'яної БрОФ6,5-0,15 і БрОФ7-0,2 ГОСТ 5017-2006. На зразки наносилися утомні центральні та крайові тріщини згідно з ГОСТ 25.506-85 «Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик ...». Зокрема, для бронзи БрОФ6,5-0,15 було обрано основний рівень фактору  $X_1$  в натуральному масштабі  $n_{TP} = 50$  при інтервалі варіювання  $\Delta n_{TP} = 30$ , фактору  $X_2$  –  $\varepsilon_m = 0,50 \cdot 10^{-5}$  при інтервалі варіювання  $0,25 \cdot 10^{-5}$ , фактору  $X_3$  –  $T = +50,0$  °C при інтервалі варіювання  $30,0$  °C.

Було побудовано кілька планів першого порядку, які відрізнялися один від одного кількістю дублювань дослідів в кожній точці плану (від 1 до 5). Більшість з них виявилися згідно з F-критерієм неадекватними. Навпаки, застосування планів другого

порядку показало адекватність отриманих залежностей між кількістю  $n_{\text{ТР}}$  тріщин в бронзі БрОФ6,5-0,15 і зміною  $\Delta c/c$  швидкості акустичної хвилі.

### **Висновки**

Вимірювання зміни  $\Delta c/c$  швидкості розповсюдження акустичної хвилі через конструкційний матеріал дозволяє ефективно контролювати кількість  $n_{\text{ТР}}$  або середній розмір  $l_{\text{ТР}}$  тріщин в цьому матеріалі.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Красильников В. А. Нелинейная акустика конденсированных сред: история и развитие / В. А. Красильников // Акустический журнал. – 1999. – Т. 45. – № 3. – С. 423–430.
2. Ландау Л. Д. Теория упругости / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц – М. : Наука, 1987. – 246 с.
3. Зарембо Л. К. Введение в нелинейную акустику / Л. К. Зарембо, В. А. Красильников – М. : Наука, 1966.
4. Взаимодействие акустических волн с трещинами: упругие и неупругие механизмы нелинейности с различными временными масштабами / Зайцев В. Ю., Гусев В. Э., Назаров В. Е., Кастаньеде Б. // Акустический журнал. – 2005. – Т. 51. – Дополн. – С. 80–91.
5. Назаров В. Е. Влияние структуры меди на её акустическую нелинейность / В. Е. Назаров // Физика металлов и металловедение. – 1991. – Т. 37. – № 1. – С. 150–156.
6. Ультразвуковые методы исследования дислокаций / Сб. статей под ред. Л. Г. Меркулова. – М. : ИИЛ, 1963.

### **Контроль наличия трещин в конструкционных материалах на основе эффекта изменения скорости распространения акустической волны**

**Лисовец С. Н., Печенюк К. Л.**

*Киевский национальный университет технологий и дизайна*

*Рассмотрен неразрушающий акустический контроль наличия трещин в конструкционных материалах, в частности, в бронзе оловянной БрОФ6,5-0,15. Показано, что измерение амплитудно-зависимого изменения скорости распространения акустической волны позволяет эффективно контролировать количество или размеры трещин в этом материале.*

**Ключевые слова:** акустическая волна, высшие гармоники, квадратическая нелинейность, микронеоднородная среда, нелинейный эффект, структурная нелинейность

*The control of cracks in structural materials based on the effect of changing the propagation velocity of acoustic waves*

*Lisovets S. N., Pechenjuk K. L.*

*Kyiv national university of technologies and design*

*Considered non-destructive acoustic testing of cracks in structural materials, in particular, in bronze pewter БрОФ6,5-0,15. It is shown that the measurement of amplitude-dependent change of the propagation velocity of acoustic waves can effectively control the number or size of cracks in this material.*

**Keywords:** *acoustic wave, higher harmonics, quadratic nonlinearity, micro-nonuniform environment, nonlinear effect, structural nonlinearity*