

УДК 534.08

ЛІСОВЕЦЬ С.М., КІВА І.Л.

Київський національний університет технологій та дизайну

АКУСТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ МАТЕРІАЛІВ ІЗ НЕОДНОРІДНОЮ СТРУКТУРОЮ МЕТОДАМИ НЕЛІНІЙНОЇ АКУСТИКИ

Мета. Виявлення характеру впливу на результат акустичного контролю параметрів акустичної хвилі та навколишнього середовища.

Методика. Використання багатофакторного експерименту з дублюванням дослідів і подальшою побудовою поліномної математичної моделі для врахування впливу на результат акустичного контролю як параметрів акустичної хвилі, таких як амплітуда і частота, так і параметрів навколишнього середовища, таких як температура.

Результати. Отримано рекомендації щодо вибору при проведенні багатофакторного експерименту кількості значущих факторів та кількості рівнів кожного фактора, а також рекомендації щодо вибору лінійних планів та планів другого порядку.

Наукова новизна. Розбиття кожного фактора на кілька рівнів дозволяє будувати більш адекватні акустичні моделі матеріалів із неоднорідною структурою.

Практична значимість. Застосування отриманих акустичних моделей дозволяє підвищувати вірогідність акустичного контролю і його роздільну здатність.

Ключові слова: матеріали із неоднорідною структурою, тензор деформацій, тензор напруг, багатофакторний експеримент, вхідний фактор, цільова функція.

Вступ. Крім твердих тіл (матеріалів) з однорідною, або практично однорідною структурою існує цілий клас ще недостатньо вивчених слабо-неоднорідних тіл (матеріалів), або тіл (матеріалів) із неоднорідною структурою. Характерною особливістю таких матеріалів є наявність мезомасштабних (тобто середніх за розмірами) неоднорідностей і дефектної структури. Дефекти помітно змінюють співвідношення між макроскопічними значеннями деформацій і напруг (механічних) або через сильне нелінійне локальне деформування в околиці “м’яких” включень (тріщин, порожнин, пор), або внаслідок концентрації внутрішніх напруг в околиці певних особливих точок (гостра вершина тріщини, границі зерен) [1].

Особливістю таких властивостей матеріалів із неоднорідною структурою також є те, що при відносно невеликих амплітудах акустичної хвилі вони досить сильно виявляють свої нелінійні властивості [1], які проявляється в різноманітних нелінійних ефектах [2]. Така дуже “корисна” властивість матеріалів із неоднорідною структурою (до яких можна віднести, наприклад, “м’які” конструкційні полікристалічні матеріали, такі як бронза, латунь або мідь), дозволяє використовувати для їх контролю методи нелінійної акустики.

Постановка завдання. Виникає необхідність акустичного контролю матеріалів із неоднорідною структурою таким чином, щоб, з одного боку, підвищити вірогідність і

роздільну здатність контролю, а з іншого боку суттєво не підвищувати складність апаратури та її загальну вартість.

Існує декілька методів нелінійної акустики, які досить часто застосовуються. Наприклад, лазерна доплерівська віброметрія дозволяє вимірювати амплітуду коливань в різних точках поверхні матеріалу, що контролюється, на основній частоті і на її гармоніках. Але її реалізація часто є досить складною, має високу вартість і підходить не для всіх поверхонь матеріалів, що контролюються. Як альтернатива пропонуються акустичні методи контролю із застосуванням таких нелінійних ефектів, як зміна $\Delta c/c$ швидкості розповсюдження акустичних хвиль [3] і зміна $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання акустичних хвиль [4].

Більш конкретно завдання акустичного контролю полягає в дослідженні “м’яких” конструкційних полікристалічних матеріалів, таких як бронза, латунь або мідь, акустичними хвилями середньої інтенсивності таким чином, щоб, наприклад, міцнісні властивості цих матеріалів або поверхневі та глибинні дефекти цих матеріалів (тріщини, розшарування, зони корозії і так далі) можна було зв’язати із змінами $\Delta c/c$ та/або $\Delta K/K$.

Результати дослідження. Теоретичні основи розповсюдження акустичних хвиль, і зокрема поздовжніх, в твердих тілах розроблені вже досить давно [5]. Вони базуються на тому, що під впливом прикладених сил тверді тіла деформуються, тобто змінюють свою форму і об’єм. Зміни елементів довжини при деформуванні твердого тіла описуються за допомогою тензора деформації u_{ik} четвертого рангу, який в загальному випадку має наступний вигляд:

$$u_{ik} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} + \frac{\partial u_l}{\partial x_i} \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right), \quad (1)$$

де u_i, u_k, u_l – вектор деформацій;

x_i, x_k – координата.

При цьому робиться припущення, що практично у всіх випадках деформування твердих тіл деформації виявляються малими: це означає, що зміна будь-якої відстані в твердому тілі є малою у порівнянні із цією відстанню. Іншими словами, відносні подовження малі у порівнянні з одиницею. Тому у виразі (1) нехтують останнім членом як малою величиною другого порядку, а тензор деформації u_{ik} приймає наступний вигляд:

$$u_{ik} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right). \quad (2)$$

А напруги (механічні) при деформуванні твердого тіла описують за допомогою тензора напруг σ_{ik} четвертого рангу, який в загальному випадку має наступний вигляд:

$$\frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} = F_i, \quad (3)$$

де F_i – вектор сил, який діє на певний об’єм твердого тіла.

Таким чином, застосовуючи тензорні обчислення та оперуючи тензорами деформації u_{ik} і напруг σ_{ik} , можна описати розповсюдження акустичних хвиль через тверде тіло.

Але розповсюдження акустичних хвиль в матеріалах із неоднорідною структурою має багато особливостей, однією з яких є наявність амплітудно-залежного внутрішнього тертя. Його в загальному вигляді можна описати за рахунок нелінійних гістерезисних рівнянь стану, наприклад, наступним чином (для одномірного випадку розповсюдження акустичної хвилі)

$$\sigma\left(\varepsilon, \frac{d\varepsilon}{dt}\right) = E\left(\varepsilon - f\left(\varepsilon, \frac{d\varepsilon}{dt}\right)\right), \quad (4)$$

де E – лінійний модуль пружності (модуль Гука);

ε – відносна деформація;

$f\left(\varepsilon, \frac{d\varepsilon}{dt}\right)$ – нелінійна кусково-неперервна функція.

Щодо обробки результатів акустичного контролю, то пропонується застосовувати багатофакторний експеримент, так як він у порівнянні із іншими методами математичної обробки результатів вимірювань має багато переваг. Основним завданням при проведенні багатофакторного експерименту є підбір необхідних факторів, які повинні бути незалежними, вимірюваними, керованими і сумісними (тобто щоб можна було здійснити всі заплановані комбінації рівнів факторів).

Як показують результати досліджень [6], одним із основних вхідних факторів є, безперечно, температура T , так як вона змінює практично всі фізико-механічні властивості матеріала: в'язкість, теплопровідність та інші. Також безперечно, що ще одним вхідним фактором буде амплітуда ε відносної деформації, яку викликає акустична хвиля при випроміненні в матеріал із неоднорідною структурою [7]. Крім того, в якості ще одного вхідного фактору можна застосувати частоту f акустичної хвилі, що випромінюється в матеріал [7]: це в загальному випадку пов'язано із тим, що при взаємодії акустичної хвилі з матеріалом необхідно враховувати резонансні частоти “м'яких” включень (тріщини, розшарування, зони корозії і так далі) і частоти релаксації цих “м'яких” включень, а також частотно-залежне співвідношення між впливами пружної та дисипативної акустичних нелінійностей. Останніми вхідними факторами є зміни $\Delta c/c$ швидкості розповсюдження і $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання акустичних хвиль.

Як показав аналіз [8], вхідні фактори іншої фізичної природи зазвичай є незначущими і їх при проведенні акустичного контролю можна не враховувати.

Цільова функція ψ багатофакторного експерименту повинна мати ясний фізичний смисл, відрізнятися статистичною ефективністю, бути однозначною та дійсно визначати екстремум [6]. В якості цільової функції можуть виступати, наприклад, міцнісні характеристики (межі пружності, плинності, міцності), пружні характеристики (модулі пружності) або твердість матеріалів [9].

При проведенні багатофакторного експерименту необхідна матриця експерименту для реалізації всіх можливих рівнів входних факторів, причому бажано в випадковому порядку згідно з ГОСТ 11.003-73 “Прикладная статистика. Равномерно распределённые случайные числа” [6]. Обчислення дуже спрощуються, якщо при загальній кількості дослідів n і кількості входних факторів m сума x_i любого стовпця матриці експерименту дорівнює нулю:

$$\sum_{k=1}^N (x_i)_k = 0, \quad (5)$$

виконуються умови нормування матриці експерименту:

$$\sum_{k=1}^N (x_i)_k^2 = n, \quad (6)$$

виконуються умови ортогональності матриці експерименту:

$$\sum_{k=1}^N (x_i)_k (x_j)_k = 0, \quad i \neq j. \quad (7)$$

Як правило, побудову починають з лінійного дворівневого плану виду

$$\psi = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4, \quad (8)$$

Іє a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 – коефіцієнти лінійного плану (8),

які принципово можуть бути як значущими, так і незначущими;

x_1 – відповідає температурі T ;

x_2 – відповідає амплітуді ε відносної деформації;

x_3 – відповідає частоті f акустичної хвилі;

x_4 – відповідає зміні $\Delta c/c$ або $\Delta K/K$;

ψ – відповідає одній з характеристик матеріалу, наприклад, межі міцності на розрив.

Гіпотезу про адекватність лінійного плану (8) найчастіше перевіряють за F–критерієм (критерієм Фішера), порівнюючи розраховане значення із табличним значенням. F–критерій по суті відповідає на питання, наскільки лінійний план (8) передбачає гірше у порівнянні із результатами дослідів [6]. Якщо лінійний план (8) є неадекватним, то застосовують багатофакторний експеримент із розбиттям кожного фактора на, наприклад, три, чотири чи п’ять рівнів, причому рівні кожного з факторів можуть бути як рівновіддаленими, так і нерівновіддаленими.

В цьому випадку лінійний багатофакторний план (такі плани можуть бути і нелінійними по входним факторам, але завжди лінійні по невідомим коефіцієнтам a_0, a_1, a_2 і так далі) приймає вид

$$\psi = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_{12} x_1 x_2 + a_{13} x_1 x_3 + a_{14} x_1 x_4 + a_{23} x_2 x_3 + a_{24} x_2 x_4 + a_{34} x_3 x_4 \quad (9)$$

або навіть вигляд

$$\psi = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_{12} x_1 x_2 + a_{13} x_1 x_3 + a_{14} x_1 x_4 + a_{23} x_2 x_3 + a_{24} x_2 x_4 + a_{34} x_3 x_4 + a_{123} x_1 x_2 x_3 + a_{124} x_1 x_2 x_4 + a_{234} x_2 x_3 x_4 + a_{134} x_1 x_3 x_4. \quad (10)$$

Багатофакторні плани (9) і (10) враховують додатково взаємний вплив вхідних факторів один на одного. Якщо плани (9) або (10) також виявляться неадекватними, то можливо застосування нелінійних багатофакторних планів другого порядку, наприклад, наступного виду (кількість рівнів кожного фактору в таких планах повинна бути не менше трьох):

$$\psi = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{14}x_1x_4 + a_{23}x_2x_3 + a_{24}x_2x_4 + a_{34}x_3x_4 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + a_{44}x_4^2. \quad (11)$$

Проаналізувати отриманий багатофакторний план (11), тобто представити характер зміни цільової функції ψ при зміні вхідних факторів з x_1 по x_4 та знайти координати екстремуму цільової функції ψ (якщо він існує) досить складно. Тому багатофакторний план (11) перетворюють до так званого канонічного (стандартного) виду.

Таке канонічне перетворення полягає в визначенні центра поверхні другого порядку (якщо він існує), переносу початку координат в цей центр (при цьому в рівнянні (11) зникають члени виду $a_i x_i$) і повороті координатних осей (при цьому в рівнянні (11) зникають члени виду $a_{ij} x_i x_j$). При цьому багатофакторний план (11) приймає приблизно наступний вигляд:

$$\Psi = A_0 + A_{11}X_1^2 + A_{22}X_2^2 + A_{33}X_3^2 + A_{44}X_4^2, \quad (12)$$

де $A_0, A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{44}$ – коефіцієнти багатофакторного плану (12) в канонічній формі;

X_1, X_2, X_3, X_4 – нові вхідні фактори (осі координат, лінійно зв'язані із старими осями координат x_1, x_2, x_3, x_4 і повернуті відносно них на певний кут);

Ψ – цільова функція в канонічній формі.

Зазвичай багатофакторний план (12) аналізують, зафіксувавши деякі з вхідних факторів (наприклад, X_3 і X_4) таким чином, щоб осталися вільними тільки два фактори (наприклад, X_1 і X_2): таким чином можна отримати двовимірні поверхні відгуку. В нашому випадку при вільних вхідних факторах X_1 і X_2 поверхня відгуку може мати один з чотирьох варіантів вигляду: еліптичний параболоїд (коефіцієнти A_1 і A_2 мають однакові знаки), гіперболічний параболоїд (коефіцієнти A_1 і A_2 мають різні знаки), стаціонарне підняття (A_1 або A_2 дорівнює нулю) або зростаюче підняття (A_1 або A_2 дорівнює нулю, але при цьому центр поверхні відгуку знаходиться в нескінченості).

Для знаходження глобального екстремуму цільової функції Ψ застосовують, зазвичай, розв'язання рівняння (12) в матричному вигляді, виконавши попередньо перетворення його на лінійну систему рівнянь.

Висновки. В результаті визначення потреби в акустичному контролі матеріалів із неоднорідною структурою з підвищеними вірогідністю і роздільною здатність була визначена необхідність врахування амплітуди і частоти акустичної хвилі та

температури навколишнього середовища, а також побудови нелінійних багатофакторних планів другого порядку з кількома рівнями вхідних факторів.

Список використаної літератури

1. Изосимова М.Ю., Коробов А.И., Руденко О.В. Пространственное распределение нелинейного акустического параметра в тонкой поликристаллической пластине из сплава с дефектами / М.Ю. Изосимова, А.И. Коробов, О.В. Руденко // Акустический журнал. – 2009. – Т. 55. – № 2. – С. 153–159.
2. Памятных Е.А., Урсулов А.В. Нелинейные уединённые волны в нелокально упругих твёрдых телах / Е.А. Памятных, А.В. Урсулов // Акустический журнал. – 2012. – Т. 58. – № 2. – С. 193–199.
3. Патент № 34594 А. Україна. МПК G01H 5/00, G01N 29/00, G01N 29/07. Спосіб визначення залежності швидкості розповсюдження акустичних коливань від їх інтенсивності і пристрій для його здійснення. – Державна академія легкої промисловості України; Скрипник Ю.О., Лісовець С.М. – № 98052678; Заявл. 22.05.1998; Опубл. 15.03.2001, Бюл. № 2.
4. Патент № 17425 А. Україна. МПК G01N 29/00. Спосіб оцінки нелінійності акустичного тракту і пристрій для його здійснення. – Державна академія легкої промисловості України; Скрипник Ю.О., Лісовець С.М. – № 94063007; Заявл. 27.06.1994; Опубл. 06.05.1997, Бюл. № 5.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. Теоретическая физика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – 4-е изд., испр. – Т. VII. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 248 с.
6. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов. – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304 с.
7. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. Звуковые и ультразвуковые волны большой интенсивности / Л.К. Зарембо, В.А. Красильников. – М.: Наука. – 1966. – 520 с.
8. Лісовець С.М. Оптимізація акустичного контролю структурно-неоднорідних полікристалічних матеріалів методами планування експериментів / С.М. Лісовець // Вісник КНУТД. – 2013. – № 3 (71). – С. 34–40.
9. Ботаки А.А., Ульянов В.Л., Шарко А.В. Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов / А.А. Ботаки, В.Л. Ульянов, А.В. Шарко. – М.: Машиностроение, 1981. – 80 с.

АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ МАТЕРИАЛОВ С НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРОЙ МЕТОДАМИ НЕЛИНЕЙНОЙ АКУСТИКИ

ЛИСОВЕЦ С.Н., КИВА И.Л.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Определение характера влияния на результат акустического контроля параметров акустической волны и окружающей среды.

Методика. Использование многофакторного эксперимента с дублированием опытов и дальнейшим построением полиномиальной математической модели для учёта влияния на результат акустического контроля как параметров акустической волны, таких как амплитуда и частота, так и параметров окружающей среды, таких как температура.

Результаты. Получены рекомендации относительно выбора при проведении многофакторного эксперимента количества значащих факторов и количества уровней каждого фактора, а также рекомендации относительно выбора линейных планов и планов второго порядка.

Научная новизна. Разбитие каждого фактора на несколько уровней позволяет строить более адекватные акустические модели материалов с неоднородной структурой.

Практическая значимость. Применение полученных акустических моделей позволяет повышать достоверность акустического контроля и его разрешающую способность.

Ключевые слова: материалы с неоднородной структурой, тензор деформаций, тензор напряжений, многофакторный эксперимент, входной фактор, целевая функция.

ACOUSTIC CONTROL OF MATERIALS WITH HETEROGENEOUS STRUCTURE METHODS OF NONLINEAR ACOUSTICS

LISOVETS S., KIVA I.

Kyiv National University of Technologies and Design

Purpose. Determination of character of influence on the result of acoustic control of parameters of acoustic wave and environment.

Methodology. Use of multifactorial experiment with duplication of experiments and further construction of polynomial mathematical model for the account of influence on the result of acoustic control of both parameters of acoustic wave, such both amplitude and frequency and parameters of environment, such as a temperature.

Findings. Recommendations are got in relation to a choice during the leadthrough of multifactorial experiment of amount of meanings factors and amount of levels of every factor, and also recommendation in relation to the choice of linear plans and plans the second order.

Originality. Partitioning of every factor on a few levels allows to build more adequate acoustic models of materials with a heterogeneous structure.

Practical value. Application of the got acoustic models allows promoting authenticity of acoustic control and his discriminability.

Keywords: materials with a heterogeneous structure, tensor of deformations, tensor of tensions, multifactorial experiment, entrance factor, objective function.