

УДК 534.08

В.В. СЕБКО, В.Г. ЗДОРЕНКО, І.Л. КІВА

Київський національний університет технологій та дизайну

НОВІ МОЖЛИВОСТІ АКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРІДНИХ СЕРЕДОВИЩ ТА МАТЕРІАЛІВ

Розглянуто нові можливості акустичного контролю структурно-неоднорідних середовищ та матеріалів за допомогою пружних хвиль, при цьому враховується вплив на розповсюдження пружної хвилі різних додаткових чинників, таких як зміна температури об'єкта дослідження, інтенсивність пружної хвилі, частота пружної хвилі та деяких інших.

Ключові слова: багатофакторний експеримент, структурно неоднорідний полікристалічний матеріал, п'єзоелектричний перетворювач, границі зерен, гістерезисна нелінійність.

Як відомо з багатьох джерел, теорія розповсюдження пружних хвиль в так званих слабо-неоднорідних середовищах та матеріалах розроблена досить повно [1–3]. Вона базується на п'ятиконстантній теорії пружності. Але також відомо, що крім добре вивчених слабо-неоднорідних, існують ще відносно «нові» структурно-неоднорідні середовища та матеріали, які характеризуються «некласичною», дуже великою та залежною від частоти акустичною нелінійністю. Така акустична нелінійність визначається різними за фізичною природою дефектами їх структури: тріщинами, границями зерен, дислокаціями та інше, які приводять до порушення однорідної структури таких середовищ [3].

Розповсюдження пружних хвиль та їх взаємодія в структурно-неоднорідних середовищах та матеріалах супроводжується різними акустичними нелінійними ефектами, такими як генерація вищих гармонік та комбінаційних частот, затухання звука на звуці, модуляція, демодуляція, самодія і так далі [3]. При відсутності в структурно-неоднорідних середовищах та матеріалах (зокрема, в полікристалічних матеріалах) явно виражених дефектів в вигляді тріщин, пухирів газу або несучільностей, їх механічні характеристики визначаються найбільш слабкою «складовою» полікристалічного матеріалу, зокрема границями його зерен. Структура границь зерен дуже складна, тому границі зерен є важливим елементом дефектної структури полікристалічних матеріалів.

Об'єкти та методи дослідження

Властивості границі між зернами суттєво впливають на формування мікроструктури структурно-неоднорідних середовищ та матеріалів. Наприклад, вони можуть визначати характер процесів повернення або рекристалізації, сегрегації домішок або коалесценції дисперсних часток і так далі. Особливо важливу роль границі зерен відіграють в процесах деформації та руйнування при підвищених температурах. В цих умовах макроскопічні властивості структурно-неоднорідних середовищ та матеріалів залежать не тільки від загальної протяжності границь (від величини та кількості зерен), але й від мікроскопічних властивостей границь і їх структурного стану. На даний момент жодна з відомих теорій звичайних міжзерених границь не дозволяє надійно оцінювати основні термодинамічні параметри границь зерен та розраховувати їх кінетичні властивості [4].

Проведені експериментальні та теоретичні дослідження свідчать про те, що певні структурно-неоднорідні середовища та матеріали (серед них, зокрема, полікристалічні матеріали), мають сильну гістерезисну нелінійність [3]. Це призводить до різномодульності (різниці модулів пружності при

стисканні та розтягуванні), зміни ступеня нелінійності рівняння стану з цілого числа на дробове число і навпаки, наявності порога збудження по амплітуді та «повільної динаміки», дефекту модуля пружності, зміні декременту затухання та інше [5–7].

Використання рівнянь стану гістерезисної нелінійності можливо при умові, що переважаючий внесок в акустичні характеристики полікристалічних матеріалів вносить гістерезисна нелінійність границь між зернами. Гістерезисна нелінійність дозволяє описати проходження через полікристалічні матеріали як неперервної пружної хвилі, так і пружної хвилі в вигляді пакетів з кількох десятків коливань.

Для гістерезисної нелінійності характерно, що кожна гілка гістерезису є квадратичною функцією відносної деформації ε , перехід з однієї гілки гістерезису на іншу гілку гістерезису здійснюється при зміні знака ε та/або знака $\dot{\varepsilon}$, при цьому функція стану $\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ є неперервною, для досить малих відносних деформацій ε гістерезисна нелінійність відсутня або дуже мала, відношення нелінійного декременту затухання до дефекту модуля пружності при досить малих відносних деформаціях є практично постійною величиною. Існують два основних гістерезисних рівняння стану: гістерезис тертя (непружний гістерезис) та гістерезис відриву (пружний гістерезис) [5].

Рівняння стану гістерезису тертя має вигляд

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = E\varepsilon - E \left(\alpha \varepsilon_m \varepsilon + \begin{cases} 0,5\beta_1 \varepsilon^2 - 0,25(\beta_1 + \beta_2) \varepsilon_m^2, & \dot{\varepsilon} > 0 \\ -0,5\beta_2 \varepsilon^2 + 0,25(\beta_1 + \beta_2) \varepsilon_m^2, & \dot{\varepsilon} < 0 \end{cases} \right), \quad (1)$$

а рівняння стану гістерезису відриву має вигляд

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = E\varepsilon - E \left\{ \begin{cases} 0,5\gamma_1 \varepsilon^2, & \varepsilon > 0, \dot{\varepsilon} > 0 \\ -0,5\gamma_2 \varepsilon^2 + 0,5(\gamma_1 + \gamma_2) \varepsilon_m^+ \varepsilon, & \varepsilon > 0, \dot{\varepsilon} < 0 \\ -0,5\gamma_3 \varepsilon^2, & \varepsilon < 0, \dot{\varepsilon} > 0 \\ 0,5\gamma_4 \varepsilon^2 + 0,5(\gamma_3 + \gamma_4) \varepsilon_m^- \varepsilon, & \varepsilon < 0, \dot{\varepsilon} < 0 \end{cases} \right\}, \quad (2)$$

де α , β_1 , β_2 , γ_1 , γ_2 , γ_3 , γ_4 – нелінійні коефіцієнти; ε – відносна деформація; ε_m^+ – максимальна додатна відносна деформація; ε_m^- – максимальна від'ємна відносна деформація; E – модуль Юнга; σ – механічна напруга.

Також відомо, що резонансні частоти елементів границь між зернами, характерні для прояву дисипативної нелінійності, наприклад, дислокацій або груп дислокацій, складають десятки та сотні мегагерц. Тому, якщо необхідно оцінювати тільки гістерезисну нелінійність, робочий діапазон частот при використанні рівнянь стану гістерезисів тертя або відриву буде обмежений верхнім значенням в сотні кілогерц та одиниці мегагерц.

Постановка завдання

Відомо, що найбільш перспективними методами акустичного контролю полікристалічних матеріалів є методи, які базуються на вимірюванні зміни фазової швидкості $\Delta c/c$ пружної хвилі (перша та друга гармоніки) та на вимірюванні нелінійного коефіцієнта загасання $\Delta K/K$ пружної хвилі (також

перша та друга гармоніки) і порівнянні їх в подальшому із зразковими значеннями $\Delta K/K$ та $\Delta c/c$, отриманими від полікристалічних матеріалів із відомими механічними характеристиками.

Тому завдання акустичного контролю полікристалічних матеріалів полягає в тому, щоб визначити діапазони зміни параметрів пружної хвилі $\Delta c/c$ та $\Delta K/K$, які відповідають діапазонам зміни певних механічних характеристик цих матеріалів (наприклад, це може бути межа текучості σ_T або межа міцності при розриві σ_B). А також в тому, щоб визначити вплив на $\Delta c/c$ та $\Delta K/K$ не тільки механічних характеристик структурно-неоднорідних середовищ та матеріалів, але й таких додаткових факторів, як амплітуда відносної деформації пружної хвилі, температура навколишнього середовища, частота пружної хвилі, кількість пружних коливань в кожному з пакетів пружної хвилі, співвідношення амплітуд пружних коливань в кожному з пакетів, верхня та нижня межі відносної пружності границь між зернами, верхня та нижня межі частот релаксації границь між зернами, функція розподілення дефектів по відносним пружностям та по частотам релаксації і так далі.

Звідси існує необхідність в тому, щоб побудувати більш складну модель взаємодії полікристалічних матеріалів та пружної хвилі – вона може являти собою повний або дробовий факторний план для двох– або багаторівневих факторів. Таким чином, факторний план може мати більше десяти вхідних незалежних факторів, з яких одна частина факторів є значуща, а інша частина факторів є незначуща.

Результати та їх обговорення

Відомо, що для проведення повного факторного експерименту необхідна матриця планування, яка реалізує всі можливі поєднання рівнів вхідних факторів [8]. Бажано, щоб така матриця планування була симетрична відносно центра експерименту, тобто щоб сума елементів любого стовпця матриці планування дорівнювала нулю:

$$\sum_{u=1}^N x_{i u} = 0, \quad (3)$$

де i – порядковий номер фактора, $i = 1, 2, 3, \dots$; N – кількість дослідів.

Крім того, бажано, щоб така матриця планування була нормована, тобто щоб сума квадратів елементів любого стовпця дорівнювала кількості дослідів:

$$\sum_{u=1}^N x_{i u}^2 = N. \quad (4)$$

А також бажано, щоб така матриця планування була ортогональна, тобто щоб сума почленних добутків елементів любых двох стовпців дорівнювала нулю:

$$\sum_{u=1}^N x_{i u} x_{j u} = 0, \quad i \neq j. \quad (5)$$

Для мінімізації впливу систематичних похибок, які викликані зовнішніми умовами, досліді бажано проводити рандомізовано у часі, тобто в випадковій послідовності.

Цільова функція F для такої матриці планування може мати загальний вигляд:

$$\begin{aligned}
 F = & \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 + \alpha_4 x_4 + \alpha_5 x_5 + \alpha_6 x_6 + \alpha_7 x_7 + \alpha_8 x_8 + \dots \\
 & \dots + \alpha_{12} x_1 x_2 + \alpha_{13} x_1 x_3 + \alpha_{14} x_1 x_4 + \alpha_{15} x_1 x_5 + \alpha_{16} x_1 x_6 + \alpha_{17} x_1 x_7 + \alpha_{18} x_1 x_8 + \dots \\
 & \dots + \alpha_{123} x_1 x_2 x_3 + \alpha_{124} x_1 x_2 x_4 + \alpha_{135} x_1 x_3 x_5 + \alpha_{136} x_1 x_3 x_6 + \alpha_{137} x_1 x_3 x_7 + \alpha_{138} x_1 x_3 x_8 + \dots,
 \end{aligned} \quad (6)$$

де $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, \dots$ – вхідні фактори.

Тобто цільова функція F може мати постійний член, лінійні члени, члени взаємного впливу двох факторів та члени взаємного впливу трьох факторів. Як показує досвід акустичного контролю структурно-неоднорідних середовищ та матеріалів, взаємним впливом більше трьох факторів можна нехтувати. Також цільова функція F матриці планування повинна відрізнятися статичною ефективністю, бути однозначною, дійсно визначати екстремум, характеризуватися числом, мати ясний фізичний зміст.

Відомо, що повний факторний експеримент дозволяє отримати досить обширну інформацію, однак з ростом кількості факторів кількість дослідів різко зростає. Наприклад, при трьох факторах необхідно проводити $2^3 = 8$ дослідів, при шести – $2^6 = 64$ досліди, при десяти – вже $2^{10} = 1024$ досліди. Тому можна провести дробовий факторний експеримент, та обмежитися будованням лише лінійної моделі локальної ділянки поверхні відгуку цільової функції F .

Бажано, щоб плани дробового факторного експерименту, так само як і плани повного факторного експерименту, мали властивості симетричності, нормування, ортогональності та рототабельності. Звісно, при проведенні дробового факторного експерименту є значна втрата інформації у порівнянні із повним факторним експериментом – але це необхідна «платня» за суттєве скорочення кількості дослідів.

При цьому цільова функція F буде мати загальний вигляд:

$$\begin{aligned}
 F = & \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 + \alpha_4 x_4 + \alpha_5 x_5 + \alpha_6 x_6 + \alpha_7 x_7 + \alpha_8 x_8 + \dots \\
 & \dots + \alpha_{12} x_1 x_2 + \alpha_{13} x_1 x_3 + \alpha_{14} x_1 x_4 + \alpha_{15} x_1 x_5 + \alpha_{16} x_1 x_6 + \alpha_{17} x_1 x_7 + \alpha_{18} x_1 x_8 + \dots
 \end{aligned} \quad (7)$$

Тобто в цьому випадку можна обмежитися взаємним впливом лише двох факторів. Для обчислення коефіцієнтів моделей (6) або (7) можна застосувати метод найменших квадратів. Він полягатиме в тому, що мінімізуватиметься функція

$$Q = \sum_{u=1}^N F_u - \hat{F}_u^2, \quad (8)$$

де F_u – експериментальне значення цільової функції; \hat{F}_u – розраховане значення цільової функції.

Для підвищення достовірності контролю можливо застосування дублювання дослідів, тобто кожний u -й дослід можна виконати кілька раз. При цьому кожен з дублів передбачає, що дослід повністю повторюється, включаючи операції підготовки зразка, налагодження апаратури, встановлення зовнішніх умов і так далі.

Необхідно також виконати статичну обробку результатів проведення повного або дробового факторного експерименту. Статична обробка припускає, що спочатку обчислюється дисперсія дослідів. Вона може бути відома і до початку дослідів, але звичайно її оцінюють в процесі експерименту.

Наступний етап припускає обчислення коефіцієнтів регресії моделей (6) або (7) методом найменших квадратів. Після цього перевіряють гіпотезу про статичної значимості коефіцієнтів регресії – тобто чи треба отримані коефіцієнти залишити в моделях (6) або (7), чи їх можна відкинути. Для перевірки гіпотези про статичну значимість коефіцієнтів регресії попереду всього розраховують дисперсію оцінок коефіцієнтів.

Одним з головних етапів є перевірка адекватностей моделей (6) або (7), тобто пошук відповіді на питання, чи можна взагалі використовувати отримане рівняння чи може необхідно застосувати більш складну модель. Гіпотезу про адекватність моделі можна перевірити за допомогою F – критерію (критерію Фішера).

Висновки

В результаті проведення аналізу стану акустичного контролю структурно-неоднорідних середовищ та матеріалів за допомогою пружних хвиль було зроблено припущення, що необхідно враховувати вплив на результат вимірювання не тільки механічних характеристик структурно-неоднорідних середовищ та матеріалів, але й температури навколишнього середовища, частоти пружної хвилі і деяких інших.

При наявності великої кількості вхідних факторів можливо застосувати не тільки повний, але й дробовий факторний експеримент. Причому цільова функція може бути спрощена таким чином, щоб зостався взаємний вплив максимум двох факторів.

Після проведення повного або дробового факторного експерименту необхідно виконати статичну обробку результатів експерименту з метою перевірки адекватності отриманих моделей.

Список використаної літератури

1. 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.
2. 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.
3. Назаров В.Е. Взаимодействие акустических волн в микронеоднородных средах с гистерезисной нелинейностью и релаксацией / В.Е. Назаров // Акустический журнал. – 2011. – Т. 57. – № 2. – С. 204-210.
4. Чувильдеев В.Н. Неравновесные границы зёрен в металлах. Теория и приложения / В.Н. Чувильдеев. – М.: Физматлит, 2004. – 304 с. – ISBN 5-9221-0435-7.
5. Назаров В.Е., Радостин А.В. Волновые процессы в микронеоднородных упругих средах с гистерезисной нелинейностью и релаксацией / В.Е. Назаров, А.В. Радостин // Акустический журнал. – 2005. – Т. 51. – № 2. – С. 280-285.
6. Назаров В.Е. Взаимодействие акустических волн в микронеоднородных средах с гистерезисной нелинейностью и релаксацией / В.Е. Назаров // Акустический журнал. – 2011. – Т. 57. – № 2. – С. 204-210.
7. Назаров В.Е. Волновые процессы в поликристаллах с дислокационной диссипативной и реактивной нелинейностью / В.Е. Назаров // Акустический журнал. – 2008. – Т. 54. – № 2. – С. 283-290.
8. 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.

Стаття надійшла до редакції / Article received: 09.09.2013

Новые возможности акустического контроля структурно-неоднородных сред и материалов

Себко В.В., Здоренко В.Г., Кива И.Л.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Рассмотрены новые возможности акустического контроля структурно-неоднородных сред и материалов с помощью упругих волн, при этом учитывается влияние на распространение упругой волны разных дополнительных факторов, таких как изменение температуры объекта исследования, интенсивность упругой волны, частота упругой волны и некоторых других.

Ключевые слова: многофакторный эксперимент, структурно неоднородный поликристаллический материал, пьезоэлектрический преобразователь, границы зёрен, гистерезисная нелинейность.

Optimization of acoustic control of structural-heterogeneous polycrystalline materials by the methods of planning of experiments

Sebko V., Zdorenko V., Kiva I.

Kyiv National University of Technologies and Design

New acoustic checking of structural-heterogeneous environments and materials features are considered by resilient waves, influence on distribution of resilient wave of different additional factors is here taken into account, such as a change of temperature of research object, intensity of resilient wave, frequency of resilient wave and some other.

Keywords: multivariable experiment, structurally heterogeneous polycrystalline material, piezoelectric transformer, scopes of grains, hysteresis non-linearity.

УДК 677.055

Б.Ф. ППА, А.І. МАРЧЕНКО, Ю.А. КОВАЛЬОВ

Київський національний університет технологій та дизайну

ВПЛИВ ТЕРТЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ В'ЯЗАЛЬНОЇ МАШИНИ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ РОБОТИ КЛИНІВ

Представлено результати досліджень по оцінці впливу тертя робочих органів в'язальної машини (голки, клини, штеги) на зношення робочих поверхонь клинів та на їх довговічність. Приведено приклад впливу тертя пар голка-клин, голка-штеги круглов'язальної машини КО-2 на довговічність роботи кулірних клинів.

Ключові слова: в'язальна машина, голка, клин, штега, тертя, зношення клина, довговічність клина.

Підвищення ефективності роботи в'язальних машин, як відомо [1–3], можливо досягти зниженням втрат на тертя робочих органів механізму в'язання (в основному пар тертя голка-клин та голка-штеги). Тому задачею даних досліджень є аналіз впливу тертя робочих органів в'язальної машини на зношення робочих поверхонь клинів та на їх довговічність.

Об'єкт та методи дослідження

Об'єктом досліджень обрано аналіз впливу тертя пар голка-клин та голка-штеги (направляючі голки) на інтенсивність зношення робочих поверхонь клинів, що зумовлює довговічність їх роботи. При вирішенні поставлених задач були використані сучасні методи теоретичних досліджень, що базуються на теорії тертя та зношення і теорії проектування в'язальних машин.