

УДК 534.08

АКУСТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ АМПЛІТУДНО-ЗАЛЕЖНОГО ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ

А. Зенкін, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри метрології, стандартизації та сертифікації,
С. Лісовець, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерних систем,
В. Здоренко, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри,
 Київський національний університет технологій та дизайну

Розглянуто дослідження міцнісних характеристик "м'яких" полікристалічних матеріалів, зокрема латуней, шляхом їх зондування акустичними хвилями, що складаються з двох різних за амплітудами пакетів коливань. В основу дослідження покладено явище амплітудно-залежного внутрішнього тертя (АЗВТ), яке полягає в залежності коефіцієнта поглинання та швидкості акустичної хвилі від її амплітуди, причому ступінь зміни цих параметрів залежить також від міцнісних характеристик матеріалів, що досліджуються.

The article discusses a study on strength characteristics of soft polycrystalline materials, which include brass. The study is supposed sensing of such materials by acoustic waves, which consist of two different amplitude oscillations packages. The ratio between the amplitudes of these packages is maintained as accurately as possible, with the absolute stability of the amplitudes does not impose strict requirements.

Ключові слова: багатофакторний експеримент, границі зерен, зондувальна акустична хвиля, коефіцієнт поглинання, пакети коливань, план другого порядку, полікристалічний матеріал, фазова швидкість.

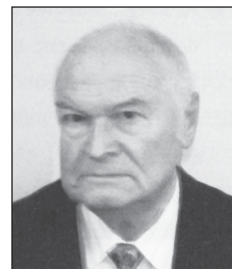
Keywords: multiple-factor experiment, grain boundaries, probing acoustic wave, absorption coefficient, packages oscillation, plan of the second order, polycrystalline material, phase velocity.

Сучасна промисловість, як відомо, випускає величезну кількість виробів, в яких застосовуються різні конструкційні матеріали. Одна із нагальних проблем за виробництва та експлуатації цих виробів — контроль їхніх міцнісних характеристик, до яких належать межа міцності за розриву σ_B , межа плинності σ_T , межа міцності на зріз σ_{CP} та деякі інші.

Найбільш точні та достовірні методи контролю цих характеристик — руйнівні методи, але в багатьох випадках останні неприйнятні через високу вартість виробу, що буде зруйнований, або через загрозу навколишньому середовищу чи життю людей. Існують також неруйнівні методи контролю, такі як електромагнітні методи, методи вимірювання твердості або методи лінійної акустики, але вони також не завжди забезпечують необхідні значення достовірності контролю та похибок

Package with small amplitude of oscillation passes through the material with almost the same group velocity and decays exponentially. And the package with large amplitude, due to the presence in the material of amplitude-dependent internal friction, feels like the speed change and the change in the attenuation. The material in this case is called structurally heterogeneous, and the passage of the acoustic wave is described by models of hysteresis friction or separation. This nonlinear behavior is due to the fact that the passage of an intense acoustic wave in the material in places of the greatest violations of the uniform structure (grain boundaries, cracks, and delamination) observed large relative deformation. But such deformations lead to deviation from the linear dependence (Hooke's law), that is, the waveform distortion and the generation of different nonlinear effects.

As a result of the control is influenced by many additional factors, such as the temperature of the material, frequency of fill packs of oscillations, the amplitude of the acoustic wave and so on, for the processing result of the control, you must use multi-factor experiment.



А. Зенкін



С. Лісовець



В. Здоренко

вимірювання. Окремо потрібно зупинитися на методах лінійної акустики. Як відомо, акустичні параметри матеріалів, у тому числі й конструкційних (такі, як швидкість розповсюдження акустичних хвиль, загасання та дисперсія), пов'язані з механічними властивостями матеріалів. Це дозволяє за акустичними параметрами матеріалів робити висновки щодо їхніх механічних властивостей. Загалом в об'ємі матеріалу можуть розповсюджуватися в довільному напрямку з різними швидкостями три пружні хвилі (одна поздовжня та дві поперечні), а на поверхні матеріалу — хвилі Релея, Стонлі (як дві хвилі Релея), Лява та деякі інші. Але вимірювання параметрів цих хвиль і встановлення зв'язку цих параметрів з механічними властивостями матеріалів часто технічно здійснити дуже складно або навіть неможливо.

Основна мета статті — удосконалення засобів метрологічного забезпечення процесу визначення межі міцності за розриву σ_B акустичними методами із застосуванням нелінійних ефектів, зокрема, амплітудно-залежного внутрішнього тертя [1]. Для врахування багатьох чинників, що впливають на результат акустичного контролю, пропонується застосовувати планування експерименту [2, 3], зокрема, із використанням планів другого порядку.

ОСНОВНИЙ ТЕКСТ СТАТТІ

Акустичний нелінійний контроль полягає у зондуванні виробів із конструкційних матеріалів пружною поздовжньою хвилею у виді пакетів пружних коливань із жорстко заданим співвідношенням амплітуд, оскільки витримати співвідношення між амплітудами пакетів пружних коливань технічно значно легше, ніж витримувати амплітуди кожного із пакетів окремо (рис. 1). Зондування (з метою усунення впливу відбиття акустичної хвилі) виконується в імпульсному режимі — тобто спочатку випромінюється більший пакет (спостерігається явище АЗВТ), потім менший пакет (явище АЗВТ відсутнє), потім знову більший пакет і так далі. У процесі досліджень

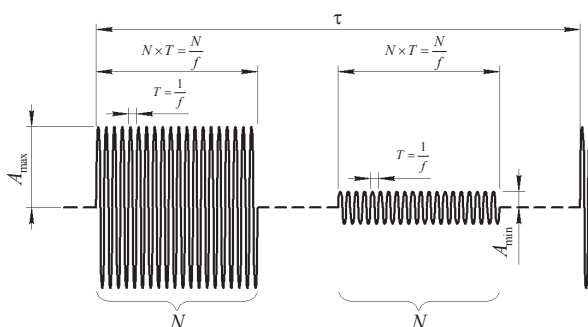


Рис. 1. Розподіл пакетів коливань у пружній хвилі

Рис. 1. Package of oscillations in elastic wave distribution

може виконуватися контроль певних матеріалів, зокрема латуней, на основі так званих «м'яких» полікристалічних металів, таких як мідь та цинк.

Наявність дислокацій в матеріалі, як відомо, визначає його міцнісні та пластичні властивості. Пластична деформація відбувається в результаті руху та розмноження дислокацій під впливом прикладеної механічної напруги. В об'ємі твердого тіла наявна мережа таких лінійних дефектів, що пересікаються та утворюють замкнені петлі або виходять на поверхню. Руху дислокацій перешкоджають точки закріплення (або області пересікання дислокаційних ліній, або комплекси точкових дефектів). У полікристалічних матеріалах протікають процеси виникнення «позитивних та «негативних» дислокацій, а також їх зникнення (анігіляції) в результаті притягування дислокацій із протилежними знаками. Особливо такі процеси протікають на границях зерен.

Міцність таких полікристалічних матеріалів визначається найбільш слабким із «елементів» таких матеріалів, а саме, границями їх зерен. Структура границь зерен дуже складна, тому границі зерен — важлива складова дефектної структури полікристалічних матеріалів. Особливо важливу роль границі зерен відіграють у процесах деформації й руйнування за підвищених механічних напруг і температур. За таких умов макроскопічні властивості полікристалічних матеріалів виявляються залежними не лише від загальної протяжності границь зерен (від величини та кількості зерен), але й від мікроскопічних властивостей границь, а також від їх структурного стану [4, 5].

У процесі контролю вимірюють зміни $\Delta c/c$ фазової швидкості c та зміни $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K пружної хвилі (на основній гармоніці), оскільки фазова швидкість c та коефіцієнт поглинання K — амплітудно-залежні, й для кожного із пакетів пружних коливань (тобто для більшого і меншого) вони відрізняються між собою [6, 7]. Така акустична нелінійність (яку часто називають структурною) полікристалічних матеріалів пов'язана, як показано вище, із наявністю в них як точкових дефектів (насамперед, атомів домішок у кристалічній ґратці), так і лінійних дефектів (насамперед, крайових, гвинтових та змішаних дислокацій).

У процесі контролю міцності вимірюються як параметри матеріалу, що контролюються (наприклад, межа міцності за розриву σ_B та температура T), так і параметри зондувальної акустичної хвилі (наприклад, амплітуда відносної деформації ϵ_m та зміни $\Delta c/c$ фазової швидкості c або $\Delta K/K$ коефіцієнта

поглинання K). Для опрацювання результату вимірювання застосовують багатфакторний експеримент. У такий спосіб є можливість створювати метрологічний «паспорт» певного виробу, який на основі $\Delta c/c$ або $\Delta K/K$ дозволяє визначати межу міцності за розриву σ_B і отже контролювати її з певним рівнем достовірності.

Як показали результати застосування багатфакторного експерименту, він дає можливість створювати адекватні (за F -критерієм) моделі, які пов'язують між собою міцнісні характеристики полікристалічних матеріалів (з одного боку) та параметри акустичної хвилі (з іншого) [2, 3]. Але, як показали результати подальших досліджень, зокрема, досліджень сплавів міді з цинком (латуней), достатньо часто у всьому діапазоні зміни вхідних (σ_B, ϵ_m, T) і вихідних ($\Delta c/c$ або $\Delta K/K$) параметрів створені моделі стають неадекватними. Одна із причин цього — те, що за створення таких моделей застосовували лише плани першого порядку і, відповідно, лише лінійну або неповну квадратичну взаємодію між вхідними факторами.

Тому пропонується за опрацювання даних застосовувати багатфакторний експеримент із планами другого порядку. Зокрема, пропонується застосовувати квадратичну модель, що має загальний вид:

$$Y = a_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} a_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} a_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq k} a_{ii} x_i^2, \quad (1)$$

де Y — функція відгуку ($\Delta c/c$ або $\Delta K/K$); a_i, a_{ij}, a_{ii} — коефіцієнти плану другого порядку; x_i, x_j — кодовані вхідні фактори (σ_B, ϵ_m та T).

Після створення такої моделі виконують перетворення рівняння у такий спосіб, щоб отримати в явному виді залежність $\sigma_B = f(\Delta c/c, \epsilon_m, T)$ або $\sigma_B = f(\Delta K/K, \epsilon_m, T)$.

Наприклад, якщо кількість k кодованих вхідних факторів дорівнює 3, то модель може мати у своєму складі максимум

$$C_{k+2}^k \Big|_{k=4} = \frac{(k+2)!}{k!2!} \Big|_{k=4} = \frac{5!}{3!2!} = 10 \quad (2)$$

коефіцієнтів плану другого порядку. Відповідно до цього кількість дослідів повинна також бути не меншою 10, причому кожний із вхідних факторів потрібно варіювати не менше ніж на трьох рівнях (а також, за необхідності, кілька раз дублювати у кожній точці плану).

Розрахунок коефіцієнтів рівняння виконують, у загальному випадку, методом найменших квадратів згідно з формулою:

$$A = (X^T X)^{-1} X^T Y, \quad (3)$$

де A — матриця коефіцієнтів плану другого поряд-

ку; X — матриця планування; Y — цільова функція ($\Delta c/c$ або $\Delta K/K$).

Для реалізації матриці планування X оптимальним є застосування симетричних композиційних ортогональних планів, тобто, коли всі досліді розташовують симетрично відносно центра (основного рівня плану), а лінійний план добудовують до плану другого порядку шляхом застосування певної кількості спеціальним чином розташованих «зіркових» точок. Основна перевага ортогональності плану — те, що всі коефіцієнти моделі можна оцінювати незалежно один від одного.

ЗАКЛЮЧНА ЧАСТИНА

Запропоновані моделі застосували для акустичного нелінійного контролю виробів із латуні. Досліджували багатокomпонентні деформовувані латуні таких різновидів: Л060-1, Л062-1, Л070-1, Л090-1. Зокрема, для олов'янистої латуні ЛС60-1 обрали основний рівень (центр плану) фактору X_1 в натуральному масштабі $\sigma_B = 550 \text{ МПа}$ за інтервалу варіювання 100 МПа , фактору X_2 — $\epsilon_m = 0,50 \cdot 10^{-5}$ за інтервалу варіювання $0,25 \cdot 10^{-5}$, фактору X_3 — $T = +50,0 \text{ }^\circ\text{C}$ за інтервалу варіювання $30,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Загальну кількість N дослідів (без урахування дублювання) визначали за формулою:

$$N = 2^k + 2k + n_{\text{Ц}} = 2^3 + 2 \cdot 3 + 1 = 15, \quad (4)$$

де 2^k — кількість дослідів у ядрі плану (повний факторний експеримент); $2k$ — кількість дослідів у «зіркових» точках; $n_{\text{Ц}}$ — кількість дослідів в центрі плану, $n_{\text{Я}} = 1$.

Властивість симетричних композиційних планів, як відомо, суттєво залежить від значення α «зіркового» плеча та кількості $n_{\text{Ц}}$ дослідів у центрі плану. Зокрема, для досягнення ортогональності таких планів необхідне виконання умови

$$(2^k + 2k + n_{\text{Ц}})2^k = (2^k + 2\alpha^2)^2, \quad (5)$$

звідки

$$\alpha^2 = \sqrt{\frac{\sqrt{(2^k + 2k + n_{\text{Ц}})2^k - 2^k}}{2}} = \sqrt{\frac{\sqrt{(2^3 + 2 \cdot 3 + 1) \cdot 2^3 - 2^3}}{2}} = \pm 1,215. \quad (6)$$


Отже, ядро плану доповнювали «зірковими» точками $\sigma_B = 428,5 \text{ МПа}$ і $\sigma_B = 671,5 \text{ МПа}$ для фактору X_1 , $\epsilon_m = 0,20 \cdot 10^{-5}$ і $\epsilon_m = 0,80 \cdot 10^{-5}$ для фактору X_2 , $T = +13,5 \text{ }^\circ\text{C}$ і $T = +86,5 \text{ }^\circ\text{C}$ для фактору X_3 .

Маючи всі необхідні вхідні фактори, створювали кілька планів другого порядку, які відрізнялися один від одного кількістю дублювань дослідів у кожній точці плану (від 1 до 3). Перевірка лінійних частин рівняння (тобто без складових $\sum_{1 \leq i < j \leq k} a_{ij} x_i x_j$ та $\sum_{1 \leq i \leq k} a_{ii} x_i^2$)

та неповних квадратичних частин рівняння (тобто без складової $\sum_{1 \leq i < j \leq k} a_{ij} x_i^2$) за F -критерієм показала, що вони неадекватні. Навпаки, урахування дослідів у «зіркових» точках та в центрі плану показало адекватність за F -критерієм отриманих планів другого порядку.

З метою подальшого підвищення адекватності отриманих моделей можна рекомендувати застосування симетричних композиційних рототабельних планів другого порядку, які передбачають значення функції відгуку Y з однаковою дисперсією у всіх точках факторного простору, які містяться на однаковій відстані від центра плану.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Назаров В.Е. Волновые процессы в поликристаллах с дислокационной диссипативной и реактивной нелинейностью / В.Е. Назаров // Акустический журнал (Nazarov, V.E. Volnovyye protsessyy v polikristallakh s dislokatsionnoy dissipativnoy i reaktivnoy nelineynostyu [Wave processes in polycrystalline samples with dislocation dissipative and reactive nonlinearity]. Acoustic journal). — 2008. — Т. 54. — № 2. — С/Р. 283—290.
2. Лісовець С.М. Оптимізація акустичного контролю структурно-неоднорідних полікристалічних матеріалів методами планування експериментів / С.М. Лісовець // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну (Lisovets, S.N. Optimizatsiya akustichnogo kontrolya strukturno-neodnorodnih polikristalichnih materialiv metodami planuvannya eksperimentiv [Optimization of acoustic control of structural-heterogeneous polycrystalline materials by methods of experiments planning]. Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design). — 2013. — № 3 (71). — С/Р. 34—40.
3. Лісовець С.М. Акустичний контроль матеріалів із неоднорідною структурою методами нелінійної акустики / С.М. Лісовець // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія «Технічні науки» (Lisovets, S.N. Akustichniy kontrol materialiv iz neodnorodnoyu strukturoyu metodami neliniynoyi akustiki [Acoustic testing of materials with heterogeneous structure by methods of nonlinear acoustics]. Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design). — № 1 (82). — 2015. — С/Р. 110—116.
4. Зименков С.В. Диссипативная акустическая нелинейность меди / С.В. Зименков, В.Е. Назаров // Физика металлов и металловедение (Zimenkov, S.V., & Nazarov, V.E. Dissipativnaya akusticheskaya nelineynost medi [Dissipative acoustic nonlinearity of copper]. Physics of metals and metallography). — 1992. — № 3. — С/Р. 62—65.
5. Назаров В.Е. Об амплитудной зависимости внутреннего трения цинка / В.Е. Назаров // Акустический журнал (Nazarov, V.E. Ob amplitudnoy zavisimosti vnutrennego treniya tsinka [About the amplitude dependence of internal friction of zinc]. Acoustic journal). — 2000. — Т. 46. — № 2. — С/Р. 228—233.
6. Патент № 34594 А. Україна. МПК G01N 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 (Skripnik, U.O., & Lisovets, S.N. (1998). Ukraine Patent № 34594 A).
7. Патент № 57892. Україна. МПК G01F 23/28. Пристрій для вимірювання нелінійності акустичних характеристик матеріалів. — Київський національний університет технологій та дизайну; Скрипник Ю.О., Лісовець С.М. — № u201013422; Заявл. 11.11.2010; Опубл. 10.03.2011, Бюл. № 5 (Skripnik, U.O., & Lisovets, S.N. (2010). Ukraine Patent № u201013422).
8. Зенкін А.С. Основи метрологічного забезпечення / А.С. Зенкін, В.П. Куценко, Г.І. Хімичева, М.Ф. Трегубов. — Донецьк: ІІШІ «Наука і освіта» (Zenkin, A.S., Kutsenko, V.P., Himicheva, A.I., & Tregubov, N.F. Osnovi metrologichnogo zabezpechennya [Fundamentals of metrological support]. Donetsk: Institute of problems of artificial intelligence «Science and education» [in Ukraine]), 2014. — 324 с/р.
9. Метрологія: теорія і нормативне забезпечення: [навчальний посібник] / Волков О.І., Величко О.М., Хімичева Г.І. та ін.; за заг. ред. А.С. Зенкіна. — К.: Вища школа (Volkov, O.I., Velichko, O.N., Himicheva, A.I., & Zenkin, A.S. Metrologiya: teoriya i normativne zabezpechennya [Metrology: theory and regulatory support]. Kiev: High school [in Ukraine]), 2008. — 335 с/р.
10. Інформаційні та вимірювальні системи: теорія та практика: [посібник] / Хімичева Г.І., Величко О.М., Іванченко О.В. та ін. — К.: Основа (Himicheva, A.I., Velichko, O.N., & Ivanchenko, A.V. Informatsiyini ta vimiryuvalni sistemi: teoriya ta praktika [Information and measurement systems: theory and practice]. Kiev: The basis [in Ukraine]), 2006. — 448 с/р.
11. Волков А.І. Інформаційні вимірювальні системи: [навчальний посібник] / Волков О.І., Зенкін А.С., Хімичева Г.І. — К.: Наукова думка (Volkov, O.I., Zenkin, A.S., & Himicheva, A.I. Informatsiyini vimiryuvalni sistemi [Information measurement systems]. Kiev: Scientific thought [in Ukraine]), 2005. — 327 с/р. 

Отримано / received: 03.12.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Н.М. Зашчепкіною (Україна).
Prof. N.M. Zashchepkina, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.