

ОЦІНКА ВІДПОВІДНОСТІ ПРОДУКЦІЇ

УДК 534.08

Лісовець С. М., Зенкін А. С.

КОНТРОЛЮВАННЯ МІЦНОСТІ СИЛОВИХ КОНСТРУКЦІЙ З ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НЕРУЙНІВНИХ НЕЛІНІЙНИХ АКУСТИЧНИХ МЕТОДІВ

У статті розглянуто проблему розроблення засобів контролювання характеристик міцності силових конструкцій, виготовлених з полікристалічних матеріалів, таких як межа міцності на розтягання, межа міцності на стиснення, межа міцності на зсув тощо, за рахунок використання нелінійних акустичних ефектів зміни коефіцієнта поглинання та/або групової швидкості (фазової швидкості певних гармонік) акустичної хвилі великої інтенсивності, яка є зондувальною для таких силових конструкцій.

Ключові слова: внутрішнє тертя, гістерезисна нелінійність, дефект, дислокація, нелінійне поглинання, нелінійна зміна швидкості, нелінійний ефект, тріщина.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Промисловість України виготовляє значну кількість силових конструкцій, у складі яких є такі полікристалічні матеріали, як латунь чи бронза. До таких конструкцій належать підшипники, арматура, втулки, шестерні, черв'яки, сідла клапанів, гвинти, вали тощо. Один з основних параметрів таких конструкцій – це зазвичай міцність. Розрізняють різні характеристики міцності – межа міцності на розтягання, межа міцності на стиснення, межа міцності на зсув тощо [1]. На міцність полікристалічних матеріалів впливають багато чинників, пов'язаних з дефектами їх структури. Це, зокрема, дислокації, границі зерен, тріщини, пори, вкраплення, локальні місцеві напруження тощо [2]. Явні дефекти полікристалічних матеріалів, такі як, наприклад, тріщини або пори, можуть бути виявлені традиційними методами дефектоскопії. А от, наприклад, ріст кількості дислокацій традиційними методами дефектоскопії не завжди може бути виявлений.

Отже, достовірне оцінювання міцності силових конструкцій, виготовлених з полікристалічних матеріалів, залишається актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Полікристалічні матеріали й зокрема ті, у складі яких є мідь [3, 4] і цинк [5, 6], належать до так званих структурно-неоднорідних матеріалів. У таких матеріалах поширення інтенсивних акустичних хвиль супроводжується різними нелінійними ефектами, основними з яких є викривлення форми акустичних хвиль, нелінійне поглинання акустичних хвиль, нелінійна зміна швидкості акустичних хвиль, генерація вищих гармонік [7]. Виникнення таких нелінійних ефектів можна пояснити, застосовуючи рівняння стану відповідного структурно-неоднорідного матеріалу [8]. На низьких частотах акустичних хвиль акустичні властивості структурно-неоднорідних матеріалів можна описати, застосовуючи поняття гістерезисної нелінійності [9, 10], яке тісно пов'язане з поняттям амплітудно-залежного внутрішнього тертя [11]. Одним з проявів амплітудно-залежного внутрішнього тертя є його висока чутливість до зміни щільності дислокацій [12] і, в кінцевому випадку, до зміни кількості дефектів структури структурно-неоднорідних матеріалів.

Отже, можна простежити зв'язок між, з одного боку, певними дефектами структури

структурно-неоднорідних матеріалів, а з іншого боку, параметрами акустичних хвиль, які проходять крізь такі матеріали.

Мета статті. Отже, постановка проблеми полягає в розробленні засобів контролю властивостей силових конструкцій, виготовлених з полікристалічних матеріалів, використовуючи певні акустичні нелінійні ефекти.

Викладення основного матеріалу. Як зазначено вище, одними з основних показників міцності силових конструкцій, виготовлених з полікристалічних матеріалів, можна назвати межі міцності на розтягання, стиснення, зсув тощо [1]. Переважна кількість наявних методів вимірювання й контролювання цих показників є руйнівними. Здебільшого руйнування наявних силових конструкцій з метою визначення їх показників міцності є абсолютно неприйнятним, оскільки воно пов'язане з високою вартістю таких конструкцій, безпекою людей і навколишнього середовища або з якимось іншими причинами. Наявні неруйнівні методи вимірювання й контролювання показників міцності силових конструкцій, такі як механічні, акустичні, електрофізичні, іонізувального випромінювання та деякі інші, не завжди можуть забезпечити необхідний рівень точності й достовірності.

Певним виходом з цього положення є застосування неруйнівних нелінійних акустичних методів, які ґрунтуються на таких нелінійних ефектах амплітудно-залежного внутрішнього тертя: нелінійному декременті загасання й дефекті модуля пружності [13, 14]. При цьому основними наслідками цих нелінійних акустичних ефектів є амплітудно-залежні зміни коефіцієнта поглинання акустичної хвилі [15, 16] і групової швидкості поширення акустичної хвилі (або фазової швидкості поширення певних гармонік акустичної хвилі) [15, 16]. У процесі експлуатації таких конструкційних матеріалів міцність на розтягання могла змінюватися, наприклад, під впливом високих температур, навіть у кілька разів без явних зовнішніх ознак – це неприпустимо з точки зору безпеки силових конструкцій, виготовлених з цих матеріалів.

Отже, мета дослідження також полягає в отриманні аналітичних або експериментальних залежностей, які дають можливість за змінами коефіцієнта поглинання та/або групової швидкості (фазової швидкості певних гармонік) акустичної хвилі визначити певні показники міцності силових конструкцій – наприклад, межі міцності силових конструкцій на розтягання. Відповідно до цього завдання дослідження полягають у визначенні послідовності вимірювання цих залежностей і розробленні технічних засобів для вимірювання цих залежностей [17–19].

Серед конструкційних матеріалів силових конструкцій, які досліджували, були олов'яні бронзи БрОФ6,5-0,15 і БрОФ7-0,2 ГОСТ 5017–2006 «Бронзы оловянные, обрабатываемые давлением. Марки». Ці бронзи призначені для виготовлення деталей машин, підшипників, арматури, втулок, шестерень, черв'яків, деталей хімічного обладнання тощо. Для бронзи БрОФ6,5-0,15 межа міцності на розтягання згідно з ГОСТ 5017–2006, зокрема, могла бути в діапазоні від 220 (відпалений стан) до 730 МПа (деформований стан) – тобто відношення максимально можливого значення межі міцності до мінімально можливого становило приблизно 3,3. А для бронзи БрОФ7-0,2 межа міцності на розтягання могла бути в діапазоні від 410 до 950 МПа за відношення максимально можливого значення межі міцності до мінімально можливого приблизно 2,3. Як можна побачити, однаковий за хімічним складом матеріал міг мати межі міцності на розтягання в дуже широкому діапазоні значень. Досліджувані зразки мали сортамент згідно з ГОСТ 10025–78 «Прутки оловянно-фосфористой бронзы. Технические условия» їх діаметр становив від 20 до 50 мм, а довжина від 500 до 1000 мм.

Для дослідження міцності силових конструкцій використовували вдосконалену експериментальну установку, основне завдання якої полягало у випромінненні в елементи силової конструкції, міцність яких контролюють, пакетів акустичних коливань і в

подальшому вимірюванні параметрів прийнятих пакетів акустичних коливань, які пройшли ці елементи силової конструкції (див. рисунок 1) [20]. До складу установки належали: 1 – генератор електричних коливань; 2, 8 – дільники напруги; 3, 9 – перемикачі; 4 – підсилювач потужності; 5, 7 – п'єзокерамічні перетворювачі; 6 – елемент силової конструкції; 10 – вибірковий підсилювач; 11 – фазовий детектор; 12 – амплітудний детектор; 13, 14 – вимірювальні прилади; 15 – дільник частоти.

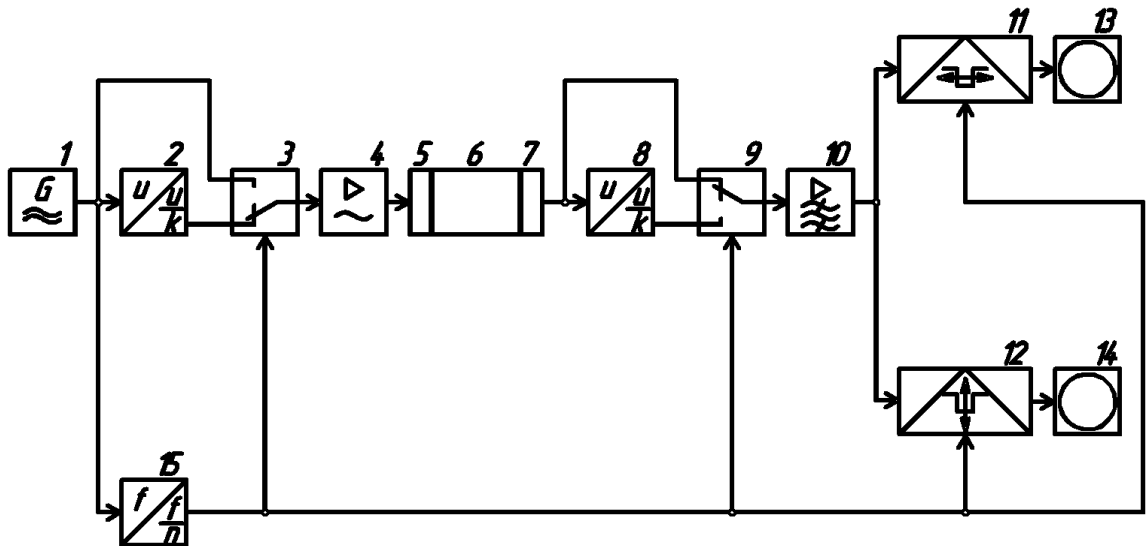


Рисунок 1. Структурна схема експериментальної установки для неруйнівного нелінійного акустичного контролю

Головний принцип роботи установки полягав у тому, що в елемент силової конструкції 6 по черзі випромінювалися пакети акустичних коливань, які відрізнялися своєю амплітудою (див. рисунок 2).

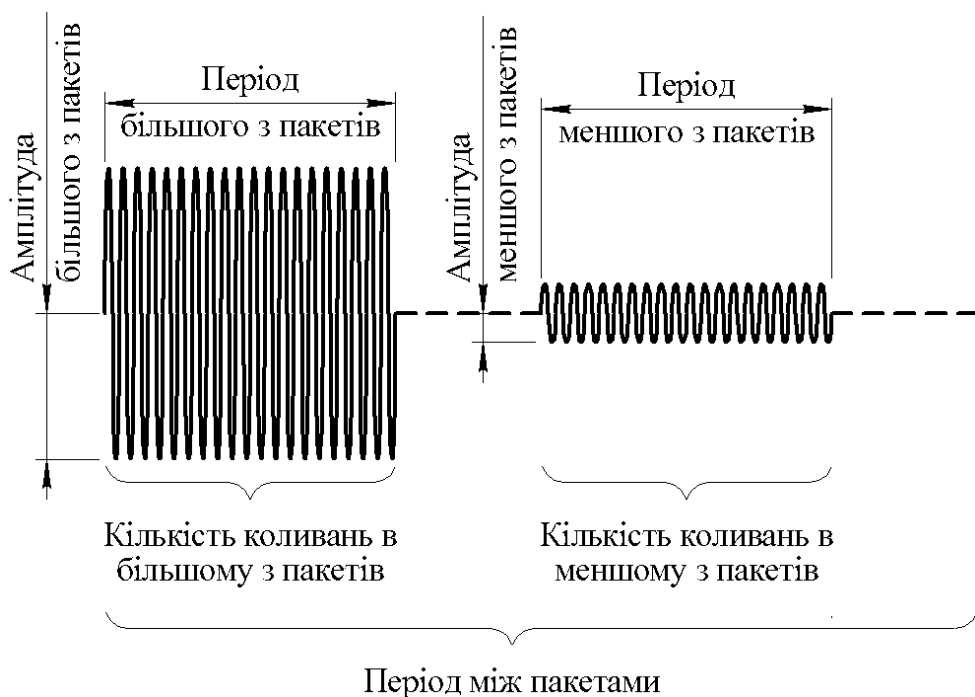


Рисунок 2. Пакети акустичних коливань

Сигнал від генератора електричних коливань 1 проходив крізь перемикач 3 і підсилювач потужності 4 на п'єзокерамічний перетворювач 5 – так формувався більший з пакетів акустичних коливань. Аналогічно до цього сигнал від генератора електричних коливань 1 проходив додатково крізь дільник напруги 2 й далі через перемикач 3 і підсилювач потужності 4 на п'єзокерамічний перетворювач 5 – так формувався менший з пакетів акустичних коливань. Ці пакети акустичних коливань, пройшовши елемент силової конструкції 6, приймав п'єзокерамічний перетворювач 7. Оскільки перемикачі 3 й 9 працювали «протифазно», то після п'єзокерамічного перетворювача 7 більший з пакетів акустичних коливань проходив додатково крізь дільник напруги 9, а менший з пакетів акустичних коливань крізь цей дільник не проходив. Отже, елемент силової конструкції 6 по суті зондувався пакетами акустичних коливань з амплітудами, які на один або навіть два порядки відрізнялися одна від одної – але при цьому більші й менші з пакетів електричних коливань на вході вибіркового підсилювача 10 відрізнялися між собою амплітудами й фазами лише за рахунок структурної нелінійності матеріалів, які досліджували. Вибірковий підсилювач 10 підсилював пакети електричних коливань, після чого вони надходили одночасно на фазовий детектор 11 і амплітудний детектор 12. Оскільки при цьому більший і менший з пакетів електричних коливань відрізнялися між собою за амплітудами і фазовим зсувами не більше ніж на $(0,5...2,0)\%$, то нелінійність самого вибіркового підсилювача 10 зведено до мінімуму.

Для деяких відомих полікристалічних матеріалів, зокрема для латуней і бронз, збільшення амплітуди акустичної хвилі приводить до збільшення коефіцієнта поглинання й до зменшення групової швидкості (фазової швидкості певних гармонік) акустичної хвилі. Отже, наприклад, обвідна більшого й меншого з пакетів електричних коливань після амплітудного детектора 12 мала приблизний вигляд, показаний на рисунку 3.

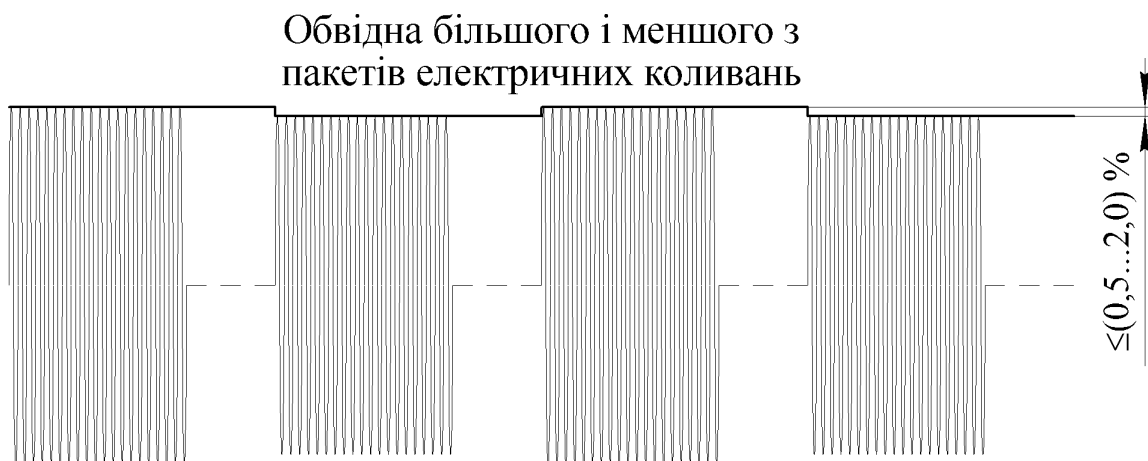


Рисунок 3. Обвідна більшого й меншого з пакетів електричних коливань після амплітудного детектора 12

Обвідна більшого й меншого з пакетів електричних коливань після фазового детектора 11 мала аналогічний вигляд. У цій обвідній можна було виділити як змінний, так і постійний складник. Оскільки відношення змінного складника до постійного становило зазвичай не більше ніж $(0,5...2,0)\%$, а іноді й значно менше, то вимірювання змінного складника на «тлі» постійного складника являло собою досить складну задачу. Проте її була успішно розв'язано з застосуванням оригінальних технічних рішень як для фазових вимірювань [21], так і для амплітудних вимірювань [22].

Для опису нелінійних акустичних ефектів амплітудно-залежного внутрішнього тертя застосовували дислокаційну теорію амплітудно-залежного поглинання Гранато–Люкке [23], яка будувалася на струнній моделі дислокацій Кьолера [24]. Що стосується полікристалічних металів, то з'ясовано, що їх гістерезис пов'язаний переважно з відривом дислокацій від домішкових атомів.

У цій теорії рівняння стану структурно-неоднорідного матеріалу виражалось залежністю

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = E(\varepsilon - f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})), \quad (1)$$

де σ – механічна напруга; ε – відносна деформація; E – модуль пружності; $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ – гістерезисна функція.

Згідно з класифікацією [25] гістерезисна функція $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ могла являти два основних типи гістерезисів: гістерезис тертя й гістерезис відриву. Гістерезисна функція $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$, яка описує гістерезис тертя, мала вигляд, як показано на рисунку 4,а. Гістерезисна функція $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$, яка описує гістерезис відриву, мала вигляд, як показано на рисунку 4,б. Оскільки графіки прямого й зворотного ходу на рисунках 4,а й 4,б відрізняються один від одного, то ця відмінність визначає значення амплітудно-залежного внутрішнього тертя.

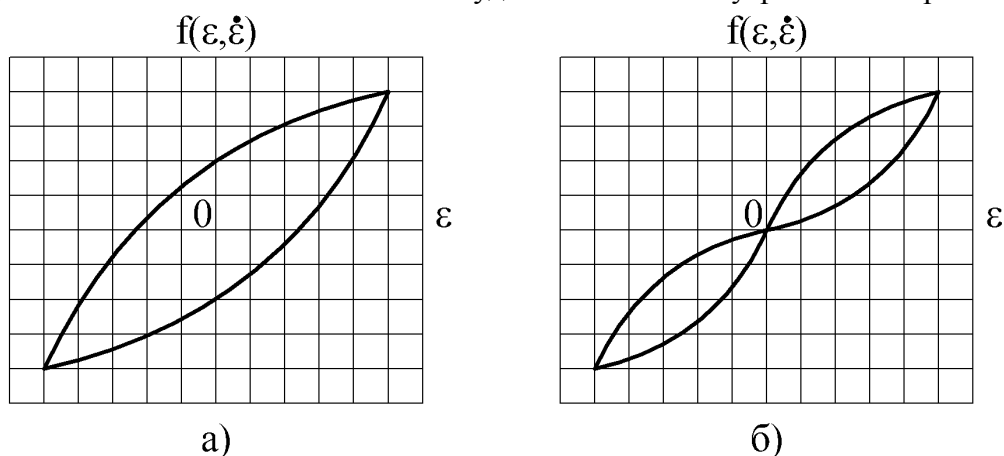


Рисунок 4. Гістерезисна функція $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$, яка описує гістерезиси тертя (а) і відриву (б)

Під час контролювання вимірювали зміни $\Delta c/c$ фазової швидкості c та зміни $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання K першої гармоніки акустичної хвилі, оскільки фазова швидкість c і коефіцієнт поглинання K є амплітудно-залежними. Оскільки на результат контролю впливала не тільки межа міцності σ_M (наприклад, на розтягання, на стиснення, на зсув тощо), а й такі параметри, як температура T й амплітуда акустичної хвилі ε_m , то для подальших розрахунків застосовували багатофакторний експеримент. Цільовою функцією в такому експерименті були залежності виду $\sigma_M = f(\Delta c/c, \varepsilon_m, T)$ або $\sigma_M = f(\Delta K/K, \varepsilon_m, T)$.

Їх подано у вигляді лінійних моделей

$$\Delta c/c = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3, \quad (2)$$

$$\Delta K/K = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3, \quad (3)$$

неповних квадратичних моделей

$$\Delta c/c = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 + \alpha_{12} x_1 x_2 + \alpha_{13} x_1 x_3 + \alpha_{23} x_2 x_3, \quad (4)$$

$$\Delta K/K = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3, \quad (5)$$

і повних квадратичних моделей

$$\Delta c/c = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 + \alpha_{12} x_1 x_2 + \alpha_{13} x_1 x_3 + \alpha_{23} x_2 x_3 + \alpha_{11} x_1^2 + \alpha_{22} x_2^2 + \alpha_{33} x_3^2, \quad (6)$$

$$\Delta K/K = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2, \quad (7)$$

де α_0, β_0 – постійні коефіцієнти; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ – лінійні коефіцієнти; $\alpha_{12}, \alpha_{13}, \alpha_{23}, \beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}$ – коефіцієнти взаємного впливу; $\alpha_{11}, \alpha_{22}, \alpha_{33}, \beta_{11}, \beta_{22}, \beta_{33}$ – нелінійні коефіцієнти; x_1, x_2, x_3 – кодовані вхідні чинники.

Обчислення коефіцієнтів рівнянь (2), (4) і (6) виконували методом найменших квадратів згідно з загальною формулою

$$A = (X^T X)^{-1} X^T Y, \quad (8)$$

а коефіцієнтів рівнянь (3), (5) і (7) – згідно з загальною формулою

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y, \quad (9)$$

де A, B – матриці коефіцієнтів плану; X – матриця планування; Y – цільові функції (значення $\Delta c/c$ або $\Delta K/K$).

Отримані моделі (2) – (7) перевіряли на значимість кожного з коефіцієнтів і на адекватність згідно з F -критерієм (критерієм Фішера). Отже, з'явилася можливість для, зокрема, бронз БрОФ6,5-0,15 і БрОФ7-0,2 створити метрологічний «паспорт». Згідно з цим «паспортом», випромінюючи в силу конструцію з бронзи БрОФ6,5-0,15 або БрОФ7-0,2 акустичну хвилю заданої амплітуди ε_m за певної температури T і вимірюючи значення $\Delta c/c$ або $\Delta K/K$ за допомогою установки для неруйнівного нелінійного акустичного контролю (див. рисунок 1), можна визначити межі міцності на розтягання, стиснення, зсув тощо. Запропонований метод контролю можна використовувати не тільки для силових конструцій з наведених марок бронз, а й для силових конструцій з бронз інших марок або з інших полікристалічних матеріалів (наприклад, латуней).

Висновки. Використання нелінійних акустичних ефектів розкриває нові можливості контролювання силових конструцій з полікристалічних матеріалів, даючи можливість створення метрологічного «паспорта» кожної окремої конструції.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ботаки А. А. Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов [Текст] / А. А. Ботаки, В. Л. Ульянов, А. В. Шарко. – М.: Машиностроение, 1981. – 80 с.
2. Назаров В. Е. Амплитудно-зависимое внутреннее трение и генерация гармоник в средах с гистерезисной нелинейностью [Текст] / В. Е. Назаров, С. Б. Кияшко // Нелинейная динамика. – 2014. – Т. 10. – № 3. – С. 297–307.
3. Зименков С. В. Диссипативная акустическая нелинейность меди [Текст] / С. В. Зименков, В. Е. Назаров // Физика металлов и металловедение. – 1992. – № 3. – С. 62–65.
4. Назаров В. Е. Нелинейные акустические эффекты в отожженной меди [Текст] / В. Е. Назаров // Акустический журнал. – 1991. – Т. 37. – № 1. – С. 150–156.
5. Назаров В. Е. Диссипативная акустическая нелинейность поликристаллического цинка [Текст] / В. Е. Назаров // Акустический журнал. – 2001. – Т. 47. – № 4. – С. 509–519.
6. Назаров В. Е. Об амплитудной зависимости внутреннего трения цинка [Текст] / В. Е. Назаров // Акустический журнал. – 2000. – Т. 46. – № 2. – С. 228–233.
7. Зарембо Л.К. Нелинейные явления при распространении упругих волн в твердых телах [Текст] / Л. К. Зарембо, В. А. Красильников // Успехи физических наук. – 1970. – Т. 102. – Вып. 4. – С. 549–586.
8. Зайцев В. Ю. Уравнение состояния микронеоднородных сред и частотная зависимость их упругой нелинейности [Текст] / В. Ю. Зайцев, В. Е. Назаров, И. Ю. Беляева // Акустический журнал. – 2001. – Т. 47. – № 2. – С. 220–226.
9. Волновые процессы в средах с гистерезисной нелинейностью. Часть I [Текст] / В. Е. Назаров, А. В. Радостин, Л. А. Островский, И. А. Соустова // Акустический журнал. – 2003. – Т. 49. – № 3. – С. 405–415.
10. Волновые процессы в средах с гистерезисной нелинейностью. Часть II [Текст] / В. Е. Назаров, А. В. Радостин, Л. А. Островский, И. А. Соустова // Акустический журнал. – 2003. – Т. 49. – № 4. – С. 529–534.
11. Коробов А. И. Экспериментальные исследования упругой нелинейности в структурно-неоднородных материалах [Текст] / А. И. Коробов, Ю. А. Бражкин, Нин Ван. // Акустический журнал. – 2005. – Т. 51. – № 5. – С. 663–671.
12. Ниблетт Д. Внутреннее трение в металлах, связанное с дислокациями / Д. Ниблетт, Дж. Уилкс // УФН. – 1963. – Т. 80. – № 1. – С. 125–187.
13. Read T.A. The internal friction on single metal crystals // Phys. Rev., 1940, vol. 58, pp. 371–380.
14. Beshers D.N. Internal friction of copper and alloys // J. Appl. Phys., 1959, vol. 30, no. 2, pp. 252–258.
15. Зайцев В. Ю. Взаимодействие акустических волн с трещинами: упругие и неупругие механизмы нелинейности с различными временными масштабами [Текст] / В. Ю. Зайцев, В. Э. Гусев, В. Е. Назаров, Б. Кастаньеде // Акустический журнал. – 2005. – Т. 51. – № 7 (приложение). – С. 80–91.
16. Назаров В. Е. Самовоздействие акустических волн в средах с нелинейной диссипацией [Текст] / В. Е. Назаров // Акустический журнал. – 1995. – Т. 41. – № 2. – С. 349–352.
17. Лісовець С. М. Застосування акустичного ефекту амплітудно-залежного внутрішнього тертя при контролі деталей з полікристалічних матеріалів / С. М. Лісовець, А. С. Зенкін // Вісник інженерної академії України. – 2015. – Вип. 4. – С. 155–161.
18. Лісовець С. М. Акустичний контроль конструкційних матеріалів з використанням амплітудно-залежного внутрішнього тертя / С. М. Лісовець, А. С. Зенкін, В. Г. Здоренко // Метрологія та прилади. – 2015. – № 6 (56). – С. 24–27.
19. Лісовець С. М. Акустичний контроль матеріалів із неоднорідною структурою методами нелінійної акустики / С. М. Лісовець, І. Л. Ківа // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія «Технічні науки». – № 1 (82). – 2015. – С. 110–116.
20. Лісовець С. М. Акустичний контроль міцності структурно-неоднорідних конструкційних полікристалічних матеріалів з використанням нелінійних ефектів : дис. канд. техн. наук : 05.11.13 / Лісовець Сергій Миколайович. – Київ, 2014. – 207 с.
21. 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.
22. 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.
23. Granato, A., Lücker, K. Theory of mechanical damping due to dislocations // J. Appl. Phys., 1956, vol. 27, no. 5, pp. 583–593.
24. Koehler, J. S. Imperfections in nearly perfect crystals. New York: Wiley, 1952. P. 197–216.
25. Asano, S. Theory of nonlinear damping due to dislocation hysteresis // J. Phys. Soc. Jpn., 1970, vol. 29, no. 4, pp. 952–963.

Лисовец С. Н., Зенкин А. С.

КОНТРОЛЬ ПРОЧНОСТИ СИЛОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕРАЗРУШАЮЩИХ НЕЛИНЕЙНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

В статье рассмотрена проблема разработки средств контроля прочностных характеристик силовых конструкций, изготовленных из поликристаллических материалов, таких как предел прочности на растяжение, предел прочности на сжатие, предел прочности на сдвиг и т. д., за счет использования нелинейных акустических эффектов изменения коэффициента поглощения и/или групповой скорости (фазовой скорости определенных гармоник) акустической волны большой интенсивности, которая является зондирующей для таких силовых конструкций.

Ключевые слова: внутреннее трение, гистерезисная нелинейность, дефект, дислокация, нелинейное поглощение, нелинейное изменение скорости, нелинейный эффект, трещина.

Lisovets S. N., Zenkin A. S.

CONTROL OF STRENGTH OF POWER DESIGNS FROM POLYCRYSTALLINE MATERIALS WITH APPLICATION OF NONDESTRUCTIVE NONLINEAR ACOUSTIC METHODS

In article the problem of development of control devices of strength characteristics of the power designs made of polycrystalline materials, such as strength on stretching, strength on compression, strength on shift, etc. due to use of nonlinear acoustic effects of change of coefficient of absorption and/or group speed (phase speed of certain harmonicas) of an acoustic wave of big intensity which is probing for such power designs is considered.

Key words: internal friction, hysteresis nonlinearity, defect, dislocation, nonlinear absorption, nonlinear change of speed, nonlinear effect, crack.

Рецензент: Зенкін М.А., д-тр, техн.
наук, професор, Київський
національний університет технологій
та дизайну, м. Київ