

УДК 534.08

КОНТРОЛЬ ТВЕРДОСТІ ПОВЕРХОНЬ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ЕФЕКТУ АМПЛІТУДНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ КОЕФІЦІЄНТА ПОГЛИНАННЯ АКУСТИЧНОЇ ХВИЛІ

Лісовець С. М., Фалюш Д. Г.

Київський національний університет технологій та дизайну

Розглядається контроль твердості поверхонь конструкційних матеріалів шляхом вимірювання нелінійного коефіцієнта поглинання поверхневої акустичної хвилі. Показано, що для підвищення достовірності контролю необхідно враховувати додаткові впливаючі фактори, зокрема, температуру матеріалу і інтенсивність акустичної хвилі.

Ключові слова: амплітудно-залежне внутрішнє тертя, коефіцієнт поглинання, конструкційний матеріал, поверхнева хвиля

Конструкційні матеріали входять до складу величезної кількості виробів, які випускає промисловість. Відповідно, в цих виробках вони знаходять багато застосувань, зокрема, вони застосовуються в елементах силових конструкцій, до яких висуваються вимоги повноцінного функціонування протягом всього терміну експлуатації певного виробу. Повне руйнування елемента силової конструкції або втрата ним частини своїх механічних властивостей може привести до катастрофічних наслідків, результатом яких відповідно може бути загроза людським життям або нанесення суттєвої шкоди навколишньому середовищу.

Конструкційні матеріали мають багато механічних властивостей, зокрема, міцнісні характеристики (наприклад, межа пружності, межа текучості, межа міцності) та пружні характеристики (наприклад, модулі пружності). Природно, що на елементи силових конструкцій під час їхньої експлуатації впливають багато факторів, які в кінцевому випадку можуть привести до їх руйнування: це і старіння матеріалу, і теплові перевантаження, і вплив агресивних речовин тощо. Відповідно, існує багато технічних засобів контролю механічних властивостей конструкційних матеріалів, які базуються на різних методах вимірювання тих або інших характеристик цих матеріалів – наприклад, вихрострумові, радіохвильові або акустичні. Кожний з таких методів контролю має свої переваги і недоліки і, відповідно, свою область застосування.

Одними з найбільш перспективних методів контролю є акустичні методи, так як вони досить вдало поєднують у собі багато переваг і при цьому мають не так вже і багато недоліків. Акустичні хвилі відносно легко випромінюються в матеріал і

приймаються з нього, а правильний розрахунок параметрів акустичного тракту дозволяє отримати високу роздільну здатність визначення наявності в матеріалі різного роду дефектів.

Але існуючі акустичні методи контролю також мають певні недоліки і, незважаючи на всі свої переваги, не завжди можуть виконувати контроль з необхідною вірогідністю. Зокрема, дуже складно контролювати таку механічну властивість конструкційних матеріалів, як їх твердість (мається на увазі твердість внутрішніх або зовнішніх поверхонь), хоча важливість знання твердості таких матеріалів неможливо недооцінити. Це пов'язано із багатьма факторами, і зокрема із: складністю геометрії поверхні елементів силових конструкцій, в яких застосовуються такі конструкційні матеріали; необхідністю випромінення і приймання поверхневих пружних хвиль; впливом додаткових факторів навколишнього середовища (температура, напружений стан тощо).

Наведені недоліки існуючих акустичних засобів вимірювання твердості поверхонь можуть бути подолані за рахунок застосування нелінійних акустичних ефектів, зокрема, зміни коефіцієнта поглинання акустичної хвилі. Суть такого ефекту полягає в тому, що зміна твердості поверхні певного конструкційного матеріалу на пряму пов'язана із зміною структури поверхні цього матеріалу (наприклад, зміною розмірів зерен і складу міжзерених границь). Тому зміна твердості поверхні впливає на акустичну хвилю, яка проходить через цей конструкційний матеріал. Механізм такої взаємодії можна пояснити, зокрема, наявністю в конструкційному матеріалі амплітудно-залежного внутрішнього тертя.

Постановка завдання

Серед неруйнівних методів контролю твердості конструкційних матеріалів важливе місце посідають методи, які ґрунтуються на дослідженні акустичних процесів в «індикаторах» різних конструкцій при їх співударах з матеріалом виробу. Наприклад, вимірюються амплітуди акустичних коливань при однократних або періодичних ударах по поверхні матеріалу, що контролюється. Або вимірюється власна частота коливальної системи, яка приведена до контакту із поверхнею матеріала, що контролюється. Також можливо вимірювати періоди часу між відскоками кульки від поверхні матеріалу після її падіння на цю ж саму поверхню. Більш досконалі є методи визначення твердості поверхні матеріала, які базуються на вимірюванні резонансної частоти цього матеріала або на вимірюванні швидкості поглинання

акустичних хвиль в цьому матеріалі. Наприклад, вимірюючи резонансну частоту на однотипових деталях, можна побудувати емпіричну залежність «твердість-резонансна частота», а після внесення поправок на відхилення розмірів деталей від номінальних визначити їх твердість. Досить часто акустичний контроль застосовується для визначення твердості поверхні сталей [1, 2]. Це можна пояснити дуже широким застосуванням сталей різних марок в різних галузях промисловості. Одним з напрямів є використання акустичних поверхневих хвиль для контролю твердості матеріалу. Наприклад, в роботі [3] досліджувалася твердість поверхонь виробів круглої форми шляхом із зондування акустичними імпульсами з частотою заповнення приблизно 1,8 МГц, причому за один раз можна було дослідити більшу частину зовнішньої поверхні виробу. Так як швидкість поверхневої хвилі залежала від твердості поверхонь, то по швидкості цієї хвилі твердість поверхонь і визначалася. Основним недоліком такого способу визначення твердості було те, що на результат контролю на пряму впливали геометричні розміри поверхні цієї деталі.

Перспективним є застосування для визначення твердості поверхонь матеріалів явища амплітудно-залежного внутрішнього тертя. В загальному випадку воно полягає в тому, що розповсюдження інтенсивних акустичних хвиль (в тому числі і поверхневих) супроводжується нелінійними ефектам, які пов'язані з генерацією вищих гармонік, спотворенням форми акустичної хвилі, нелінійним загасанням тощо [4].

Поверхні конструкційних матеріалів можна віднести до мікронеоднорідних середовищ, які мають сильну акустичну нелінійність. В таких середовищах акустичні нелінійні ефекти проявляються більш інтенсивно, ніж в слабонелінійних середовищах, при цьому закономірність цих ефектів визначається рівнянням стану цього середовища. Сильна акустична нелінійність таких середовищ пов'язана з наявністю дефектів їх структури: тріщинами, границями зерен, дислокаціями тощо.

Зазвичай в низькочастотному діапазоні акустичні властивості таких мікронеоднорідних середовищ характеризуються гістерезисною нелінійністю, яка, в першу чергу, приводить до ефектів амплітудно-залежного внутрішнього тертя: нелінійному декременту загасання і нелінійному дефекту модуля пружності. Гістерезисна нелінійність описується рівнянням стану, яке складається з лінійної $E\varepsilon$ і нелінійної $E_f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ частин:

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

де $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ – нелінійна кусково-неперервна функція від ε і $\dot{\varepsilon}$.

Нелінійна кусково-неперервна функція $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ буває переважно двох видів: для гістерезису тертя (див. рис. 1, а) і для гістерезису відриву (див. рис. 1, б).

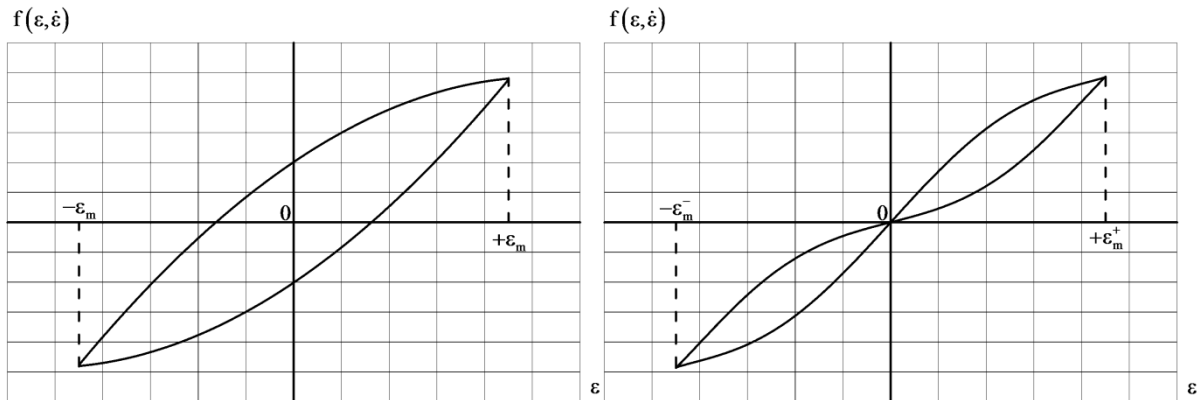


Рис. 1. Нелінійна кусково-неперервна функція $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$:
а) гістерезис тертя; б) гістерезис відриву

Аналіз літературних джерел за останні роки показує, що існують певні функціональні зв'язки між твердістю поверхонь конструкційних матеріалів і амплітудно-залежним коефіцієнтом поглинання акустичної хвилі, яка є зондуючою для цих матеріалів [5, 6]. Виявлення цих функціональних зв'язків і було основним завданням дослідження.

Результати досліджень

Для виявлення амплітудно-залежного коефіцієнта поглинання акустичної хвилі пропонується застосовувати методи нелінійної акустики і, зокрема, зондування поверхні конструкційних матеріалів акустичною поверхневою хвилею в вигляді пакетів акустичних коливань із жорстко заданим співвідношенням амплітуд [7].

Проходження більшого з пакетів повинно забезпечувати амплітуду відносної деформації поверхні конструкційного матеріалу не менше $10^{-6} \dots 10^{-5}$, так як плив амплітудно-залежного внутрішнього тертя починається приблизно з цього значення відносної деформації. А проходження меншого з пакетів не повинно викликати в товщі поверхні конструкційного матеріалу нелінійних акустичних ефектів, тому він повинен викликати амплітуду відносної деформації не більше $10^{-8} \dots 10^{-7}$.

Після прийому пакетів акустичних коливань більший з пакетів зменшується у стільки ж раз, у скільки він був більший меншого з пакетів при випроміненні акустичної хвилі. Якби явище амплітудно-залежного внутрішнього тертя було

повністю відсутнім, то після прийому було б отримано неперервні електричні коливання (див. рис. 2, а). Але через відносну зміну $\Delta K/K$ нелінійного коефіцієнта поглинання акустичної хвилі електричні коливання після прийому будуть трохи (на приблизно (0,01...1,00) %) відрізнятися одні від одних (див. рис. 2, б). Ця зміна $\Delta K/K$ і дозволяє встановити функціональний зв'язок між нею і твердістю поверхонь конструкційних матеріалів.

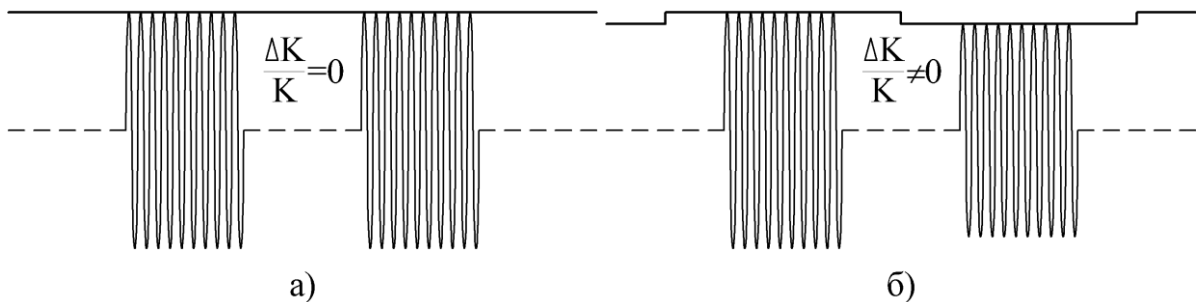


Рис. 2. Пакети електричних коливань після прийому пакетів акустичних коливань: а) зміна $\Delta K/K$ відсутня; б) зміна $\Delta K/K$ присутня

Так як нелінійні гістерезисні властивості матеріалів проявляються в основному в низькочастотному діапазоні, то частота акустичної хвилі не повинна перевищувати приблизно (0,1...1,0) МГц. З іншого боку, для накопичення нелінійних ефектів необхідно, щоб по всій довжині акустичного тракту укладалося не менше кількох десятків акустичних коливань – це разом із, зазвичай, не дуже великими розмірами поверхонь конструкційних матеріалів задає нижню межу частоти акустичної хвилі на рівні (10...100) кГц. Так як пакети акустичних коливань зазвичай утримують від 5...10 до 15...20 коливань, то для виключення явища «стоячих хвиль» і багатократного перевідбиття акустичної хвилі після випромінення і прийому кожного з пакетів коливань повинна витримуватися пауза до повного загасання відповідного пакету коливань.

Таким чином, різна твердість поверхонь конструкційних матеріалів приводить до різних відносних змін $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання акустичної хвилі, причому взаємний зв'язок між цими двома параметрами може мати досить складний характер. В основному на результат контролю впливають температура T конструкційного матеріалу і амплітуда $\epsilon_{\text{макс}}$ акустичної хвилі. Тому в процесі дослідження необхідно

контролювати як твердість поверхні конструкційного матеріалу (наприклад, НВ по Бринеллю) і її температуру T , так і параметри акустичної хвилі ($\varepsilon_{\text{макс}}$ і $\Delta K/K$).

Для обробки результатів контролю пропонується застосовувати повний багатofакторний експеримент. В результаті побудови відповідної моделі з'явиться можливість створення метрологічного «паспорту» для певного виробу з конструкційного матеріалу. Згідно з цим «паспортом» на основі вимірювання $\Delta K/K$ при відомих значеннях $\varepsilon_{\text{макс}}$ і T можна буде визначити твердість НВ поверхні конструкційного матеріалу.

Пропонується застосовувати плани першого порядку, які мають загальний вигляд

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

де a_i , a_{ij} – коефіцієнти плану; k – кількість кодованих вхідних факторів, $k=3$; x_i , x_j – кодовані вхідні фактори (перший – НВ, другий – $\varepsilon_{\text{макс}}$, третій – T).

Після побудови такого плану першого порядку (2) виконується зворотне перетворення з метою отримання явної залежності в вигляді $\text{НВ} = f(\Delta K/K, \varepsilon_m, T)$. Якщо плани першого порядку виявляються неадекватними, необхідно застосовувати більш складні плани другого порядку, які мають загальний вигляд

$$\Delta K/K = a_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} a_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} a_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq k} a_{ii} x_i^2, \quad (3)$$

де a_{ii} – додаткові коефіцієнти плану.

При цьому доцільно, щоб плани другого порядку були симетричними, композиційними і ортогональними, так як такі плани дозволяють оцінювати коефіцієнти плану незалежно один від одного.

Для проведення контролю твердості поверхонь конструкційних матеріалів було проведено дослідження з використанням бронзи олов'яної БрОФ6,5-0,15 і БрОФ7-0,2 ГОСТ 5017-2006. Зміна твердості поверхонь здійснювалася шляхом загартування та відпускання.

Зокрема, для бронзи БрОФ6,5-0,2 було обрано основний рівень фактору X_1 в натуральному масштабі $\text{НВ} = 130$ при інтервалі варіювання $\Delta \text{НВ} = 50$, фактору X_2 –

$\varepsilon_m = 0,50 \cdot 10^{-5}$ при інтервалі варіювання $0,25 \cdot 10^{-5}$, фактору $X_3 - T = +50,0^\circ\text{C}$ при інтервалі варіювання $30,0^\circ\text{C}$.

Було побудовано кілька планів першого порядку, які відрізнялися один від одного кількістю дублювань дослідів в кожній точці плану (від 1 до 10). Більшість з них виявилися згідно з критерієм Фішера (F-критерієм) неадекватними. Навпаки, застосування планів другого порядку показало адекватність отриманих залежностей між твердістю поверхонь бронзи БрОФ6,5-0,2 і зміною $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання акустичної хвилі.

Висновки

Вимірювання зміни $\Delta K/K$ коефіцієнта поглинання поверхневої акустичної хвилі, яка проходить через поверхні конструкційного матеріалу, дозволяє ефективно контролювати твердість НВ поверхонь цього матеріалу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ультразвуковой контроль твёрдости сталей / А. А. Ботаки, А. И. Глебов, А. В. Шарко // Дефектоскопия. – 1974. – № 4. – С. 124-125.
2. Об акустическом контроле твёрдости стали / А. А. Лебедев, Л. Я. Левитан, Г. И. Храмов и др. // Дефектоскопия. – 1978. – № 4. – С. 20-27.
3. Акустический контроль твёрдости поверхностных слоёв изделий сложной конфигурации / А. А. Ботаки, А. А. Лебедев, Л. Я. Левитан и др. // Дефектоскопия. – 1980. – № 6. – С. 94-96.
4. Консю Ю. Микродеформация, гистерезис и внутреннее трение поликристаллических сплавов. / Ю. Консю, Соловьев Л. А., Коваль Г. П. – В кн.: Аналитические возможности метода внутреннего трения / Под. ред. Ф. Н. Тавадзе, В. С. Постникова, Л. К. Гордиенко. – М.: Наука, 1973. – С. 28-34.
5. Рыскин Н. М. Нелинейные волны. / Рыскин Н. М., Трубецков Д. И. // Учеб. пособие для вузов. – М.: Наука, Физматлит. – 2000. – 272 с.
6. Амплитудно-зависимое внутреннее трение и генерация гармоник в средах с гистерезисной нелинейностью / В. Е. Назаров, С. Б. Кияшко // Нелинейная динамика. – 2014. – Т. 10. – № 3. – С. 297-307.
7. Лісовець С. М. Контроль наявності тріщин в конструкційних матеріалах на основі ефекту зміни швидкості розповсюдження акустичної хвилі /

С. М. Лісовець, К. Л. Печенюк // Технології та дизайн. – 2016. – № 1. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2016_1_2

Контроль твёрдости поверхностей конструкционных материалов на основе эффекта амплитудной зависимости коэффициента поглощения акустической волны

Лисовец С. Н., Фалюш Д. Г.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Рассматривается контроль твёрдости поверхностей конструкционных материалов путём измерения нелинейного коэффициента поглощения поверхностной акустической волны. Показано, что для повышения достоверности контроля необходимо учитывать дополнительные влияющие факторы, в частности, температуру материала и интенсивность акустической волны.

Ключевые слова: амплитудно-зависимое внутреннее трение, коэффициент поглощения, конструкционный материал, поверхностная волна

Control of hardness of structural materials surfaces on the basis of the effect of the amplitude dependence of the acoustic wave absorption coefficient

Lisovets S. N., Falyush D. G.

Kyiv national university of technologies and design

We consider the control of hardness of structural materials by measuring the surfaces of the nonlinear absorption coefficient of the surface acoustic wave. It is shown that to improve the reliability of the control should take into account additional influencing factors such as the temperature of the material and the intensity of the acoustic wave.

Keywords: amplitude-dependent internal friction, absorption coefficient, structural material, surface wave