

ПРЕЦИЗИЙНЕ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ УЛЬТРАЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ ЯК МЕТОД ОЦІНКИ НАПРУЖЕНЬ ТА УТОМИ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

С. М. МАЄВСЬКИЙ

НТУУ «Київський політехнічний інститут». 03056, г. Київ, пр-т Перемоги, 37. E-mail: mail@kpi.ua

Описано метод оцінювання напруженого стану і стану втоми матеріалів на основі прецизійного вимірювання швидкості розповсюдження височастотних УЗ коливань. Вимірювання товщини об'єктів і часу запізнення коливань у них виконано шляхом визначення значення кумулятивних фазових зсувів. Розглянуто корекцію похибок вимірювання внаслідок додаткових фазових зсувів, що виникають при відбитті УЗ коливань від донної поверхні об'єктів. Бібліогр. 3, рис. 2.

Ключові слова: напружений стан матеріалів, кумулятивні фазові зсуви, дефекти структури матеріалів

Вважається, що основною задачею неруйнівного контролю (НК) є визначення місця знаходження та оцінка розмірів дефектів матеріалів елементів конструкцій. Дійсно, це важлива задача і на її вирішення направлені всі основні методи НК, адже наявність дефектів структури матеріалів може свідчити про початок руйнівних процесів. Проте для конструкцій, що експлуатуються в режимі великих механічних навантажень, поява дефектів структури матеріалу, наприклад, тріщин, взагалі може бути недопустимою, бо їх швидкий ріст в умовах знакозмінних напружень матеріалу приведе до аварійного руйнування конструкції. Для матеріалів подібних конструкцій необхідні методи контролю, які могли б передбачити можливість появи дефектів і для цього має використовуватися нетрадиційний для НК параметр контрольованого матеріалу, який має опосередковано свідчити про запас його міцності.

Вивчення процесів, що відбуваються в кристалічній структурі конструкційних матеріалів в процесі багатократних знакозмінних навантажень, привели до використання такого поняття, як «втома» матеріалу, яке пояснює виникнення мікророзривів на рівні окремих кристалів [1]. Поодинокі подібні мікродефекти з еквівалентними розмірами (20...30 мкм) не впливають на міцність конструкцій і навіть не визначаються засобами неруйнівного контролю (дефектоскопами). Проте збільшення кількості подібних мікродефектів в об'ємі матеріалу конструкції робить можливим їх об'єднання і утворення тієї небезпечної тріщини, яка, маючи значний рівень напружень матеріалу на її кінцях, продовжує свій ріст, швидко ослаблюючи міцність конструкції.

Зрозуміло, що причиною появи втоми конструкційних матеріалів є їх механічне напруження внаслідок направленої дії прикладених сил. На відміну від механічного напруження втома матеріалу конструкції не має векторної ознаки.

Напружений стан конструкційних матеріалів може виникати не тільки за рахунок дії зовнішніх сил. Достатні для виникнення недопустимого напруження можуть бути і внутрішні сили, породжені, наприклад, процесами термічного походження, що мають місце при порушеннях технології ливарного виробництва, технологій зварювання та закалювання.

Контроль величини механічного напруження матеріалу може виконуватися шляхом вимірювання його деформації Δl , яка в межах пружних властивостей цього матеріалу становить $\Delta l = B(P/E)$, де B – база вимірювання деформації; P – величина механічного напруження в матеріалі; E – коефіцієнт пружності матеріалу (модуль Юнга).

Допустимі напруження в матеріалі, які не порушують умови пружної деформації, в залежності від марки сталі складають 380...1550 МПа, тоді як модуль Юнга становить 200...210 МПа. Виходячи з приведених даних, реальна величина деформації конструкційних сталей при реальній довжині бази вимірювання 10 мм зосереджена в субміліметровому лінійному діапазоні – до 20 мкм для звичайних сталей та до 50...70 мкм – для легованих.

Не дивлячись на необхідність вимірювання таких малих лінійних величин, деформація як параметр контролю широко використовується для оцінки напруженого стану матеріалу конструкцій. Основними вимірювальними перетворювачами деформації на сьогодні є тензорезистори на основі мікродроту з константану та тензорезистори, виготовлені з використанням плівкової технології. Їх перевага – простота конструкції. Але ця простота обмежує точність виконання вимірювання деформації (не краще за 1 %) та вимагає певних ускладнень електричної схеми тракту перетворення первинної інформації. Більш чутливими і точними (0,1 %) є індуктивні вимірювальні перетворювачі



деформації, які, маючи дещо складнішу конструкцію, поки що не знайшли широкого застосування.

Проте контроль величини деформації, якщо не перевищений її допустимий рівень, не може в повній мірі дати відповідь про степінь утоми матеріалу конструкції. Лише статистичний аналіз результатів вимірювання деформації з визначенням швидкості її зростання дає можливість встановити існування деструктивного процесу руйнування міжкристалічних зв'язків матеріалу.

Відомі два беззаперечних опосередкованих метода оцінювання степені утоми конструкційних матеріалів. Перший передбачає можливість оцінювання як напруженого стану, так і утоми лише феромагнітних матеріалів – сталей, за величиною зростання коерцитивної сили. Практична реалізація подібного методу вимагає використання процесу намагнічування і перемагнічування контрольованого матеріалу, що легко виконати для зразків цих матеріалів у лабораторних умовах і є проблематичним для габаритних силових конструкцій.

Другий метод, який не має подібних обмежень, використовує залежність фазової швидкості розповсюдження високочастотних ультразвукових (УЗ) коливань від структурних змін середовища матеріалу. Практична реалізація цього методу є не менш проблематичною, що пояснюється необхідністю забезпечення надто високої точності вимірювання – допустима похибка має бути на рівні сотих часток відсотку [2]. Враховуючи, що швидкість – це довжина шляху, пройденого коливаннями, поділена на часову затримку цих коливань, маємо необхідність ще з більшою точністю визначати і лінійний параметр – довжину шляху розповсюдження коливань і час затримки коливань на цьому шляху.

Не дивлячись на зазначені застереження, ми все ж зосередилися на розвитку саме УЗ методу контролю утоми конструкційних матеріалів, враховуючи його універсальність щодо видів матеріалів, з однієї сторони, та можливість апаратного вирішення з мінімальними енергетичними та матеріальними затратами, з другої.

В основі вирішення даної проблеми став запропонований нами принцип прецизійного вимірювання часової затримки УЗ коливань шляхом визначення їх фазового зсуву. Необхідна точність вимірювання часової затримки коливань частоти f реалізована завдяки визначенню накопиченого ними фазового зсуву θ° , який в подальшому називатимемо кумулятивним:

$$\tau = \frac{\theta^\circ}{360^\circ f} = \frac{N360^\circ + \psi^\circ}{360^\circ f}, \quad (1)$$

де ψ° – вимірний фазовий зсув; N – число цілих фазових циклів 360° в значенні кумулятивного фазового зсуву.

Подібний метод вимірювання часової затримки забезпечує точність, яка недосяжна для широко використовуваного в НК методу прямого вимірювання часу запізнення УЗ сигналу внаслідок похибки реального порогу чутливості амплітудного компаратора при визначенні моменту приходу луносигналу. Точність опосередкованого методу вимірювання часової затримки УЗ сигналу сягає 0,01 % навіть при похибці вимірювання фазових зсувів, рівній $\pm 1^\circ$, якщо стабільність частоти коливань менша 0,01 %, а значення $N \geq 20$, що і те, і друге легко реалізується.

Для визначення цілого числа фазових циклів у значенні кумулятивного фазового зсуву виконуємо вимірювання фазових зсувів сигналів на двох близьких частотах f , $(f + \Delta f)$, вибраних так, щоб фазові зсуви сигналів цих частот φ° і γ° гарантовано різнилися на величину меншу за 360° . Цієї умови досить просто досягти, використовуючи як генератор – синтезатор частоти, контролюючи значення фазового зсуву в процесі зміни частоти сигналів (рис. 1).

Враховуючи, що для УЗ частот сигналів необхідний приріст частоти $\Delta f \ll f$, дисперсією швидкості розповсюдження ультразвуку в реальному середовищі при зміні частоти від f до $(f + \Delta f)$ можемо знехтувати. Тоді справедливими будуть наступні рівняння [3]:

$$\tau = \frac{N360^\circ + \varphi^\circ}{360^\circ f} \quad (2)$$

$$\tau = \frac{N360^\circ + \gamma^\circ - 180^\circ [\text{sgn}(\gamma^\circ - \varphi^\circ) - 1]}{360^\circ (f + \Delta f)}$$

Прирівнюючи праві частини рівнянь (2), знаходимо значення числа N як найбільш наближеного цілого:

$$N = \left[\frac{\{\gamma - 180^\circ [\text{sgn}(\gamma^\circ - \varphi^\circ) - 1]\} f - \varphi^\circ (f + \Delta f)}{360^\circ \Delta f} \right]^+ \quad (3)$$

Певною особливістю вимірювань фазових зсувів УЗ сигналів є те, що з метою уникнення впливу реверберацій ці сигнали мають бути радіоім-

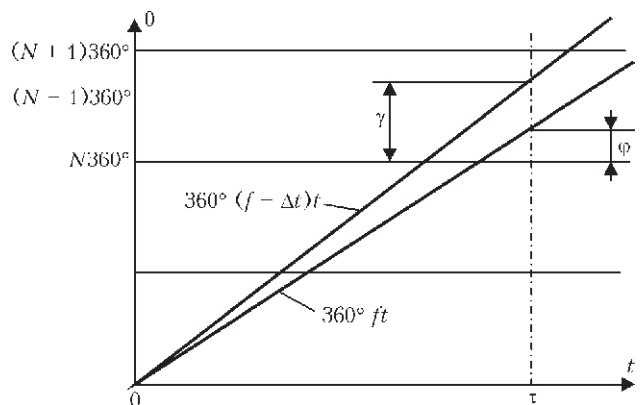


Рис. 1. Фазовий метод визначення часових затримок УЗ сигналів

пульсними. Проте тривалість цих радіоімпульсів в нашому випадку може бути достатньо великою, але не більшою за часову затримку прийнятого перетворювачем УЗ луносигналу. Для можливості вимірювання фазового зсуву УЗ коливань, які не перекриваються у часі, радіоімпульс необхідної часової довжини формується з неперервних коливань сигналу задаючого генератора за допомогою комутації. Тоді фазовий зсув коливань луносигналу, прийнятого після проходження ним середовища об'єкта контролю, вимірюється відносно опорної фази сигналу генератора. Даний спосіб визначення часової затримки може застосовуватися для всіх типів УЗ коливань.

Не аналізуючи можливі способи вимірювання фазових зсувів радіоімпульсних коливань, зупинимося на використанні найбільш простого і завадостійкого способу – фазового детектування парою подвійних балансних модуляторів з підключенням до одного з них як сигналу опорної фази – сигналу генератора, а до іншого – такого ж сигналу з фазою, зміненою на 90° , що дозволяє визначити фазовий зсув коливань прийнятого п'єзоперетворювачем радіоімпульсного сигналу як $\psi = \arctg(U_1/U_2)$, де U_1, U_2 – величини напруг на виходах фазових детекторів.

При нормальному вводі коливань в середовище плоскопаралельного зразка (елемента конструкції) його товщина може бути визначена також через часову затримку коливань. Розглянемо схему вимірювання, показану на рис. 2. Збудження коливань в середовищі об'єкта контролю виконуємо за допомогою п'єзоелектричного перетворювача з дещо розширеною головною пелюсткою діаграми направленості, для чого його діаметр має бути меншим за 6λ (тут λ – довжина хвилі коливань у середовищі об'єкта контролю). При такому збудженні коливань можемо організувати їх прийом

на протилежному боці об'єкта автономно двома перетворювачами, виділивши таким чином окремо коливання, яке падає на протилежну сторону об'єкта перпендикулярно і під певним невеликим кутом. Такий прийом коливань можемо ефективно виконати класичним дископодібним п'єзоелектричним перетворювачем, розділивши його провідне покриття з однієї сторони перетворювача концентрично на дві однакові за площею частини. Якщо діаметр пластини перетворювача становить 6λ , то в результаті ділення матимемо центральну частину діаметром $4,25\lambda$ та концентричну зовнішню частину шириною $1,75\lambda$. Відстань між центрами цих частин перетворювачів – база вимірювання B , становитиме 3λ .

Ультразвукові повздовжні коливання, які приймаються обома частинами приймального перетворювача, проходять різну відстань у середовищі матеріалу об'єкта контролю. Коливання, які приймаються центральною частиною, проходять відстань, рівну товщині об'єкта H , а периферійна частина перетворювача приймає коливання, які проходять відстань, рівну $L = \sqrt{H^2 + B^2}$. Вимірюючи часові затримки τ_1, τ_2 обох цих коливань описаним вище методом:

$$\tau_1 = \frac{N_1 360^\circ + \varphi_1}{360^\circ f}, \quad (4)$$

$$\tau_2 = \frac{N_2 360^\circ + \varphi_2}{360^\circ f}, \quad (5)$$

можемо скласти наступні рівняння для визначення швидкості їх розповсюдження C :

$$C = \frac{H}{\tau_1}, \quad (6)$$

$$C = \frac{\sqrt{H^2 + B^2}}{\tau_2}. \quad (7)$$

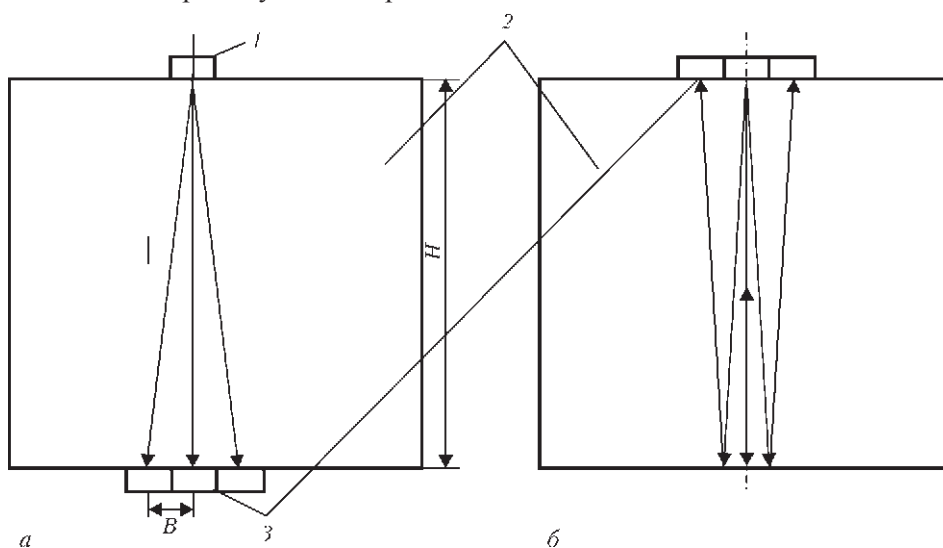


Рис. 2. Схема розповсюдження УЗ коливань у плоскопаралельному зразку: 1 – п'єзоелектричний перетворювач – збудник коливань з широкою діаграмою направленості; 2 – об'єкт контролю; 3 – концентрично розділений п'єзоелектричний перетворювач для прийому коливань (а) та для збудження коливань і прийому луносигналів (б)



Прирівнюючи праві частини отриманих рівнянь, визначаємо товщину об'єкта контролю:

$$H = \frac{\tau_1 B}{\sqrt{\tau_2^2 - \tau_1^2}} \quad (8)$$

Підставляючи значення H в рівняння (6), визначаємо швидкість розповсюдження коливань:

$$C = \frac{B}{\sqrt{\tau_2^2 - \tau_1^2}} \quad (9)$$

Як бачимо, для визначення швидкості розповсюдження УЗ коливань не обов'язково знати довжину пройденого ними шляху, якщо визначені часові затримки виділених описаним чином коливань. При цьому точність визначення швидкості залежить лише від точності встановленої бази вимірювання (відстані між центрами приймальних перетворювачів) і точності визначення часових затримок (точності визначення кумулятивного фазового зсуву).

Аналогічний спосіб вимірювання можна було б реалізувати шляхом прийому подібним перетворювачем УЗ сигналів, відбитих від донної поверхні об'єкта контролю [3]. В такому випадку випромінювачем УЗ коливань і приймачем луносигналу, відбитого від донної поверхні об'єкта при нульовому куті падіння хвилі на неї, мала б бути центральна частина концентрично розділеного п'єзoeлектричного перетворювача, а периферійна частина виконувала б роль приймача хвилі, відбитої від донної поверхні під кутом $\Delta\chi = \arctg(B/2H)$. Неоднакові умови відбиття УЗ коливань викликають різні значення додаткових фазових зсувів для луносигналів: для сигналу, що приймається центральною частиною – 180° , а для сигналу периферійної частини – $180^\circ - 2[\arctg(B/2H)]^\circ$. Ці фазові зсуви можемо оцінити величинами приросту часових затримок $\Delta\tau_1$, $\Delta\tau_2$, які відбулися за рахунок відбиття УЗ сигналів від донної поверхні об'єкта:

$$\Delta\tau_1 = \frac{1}{2f}, \quad (10)$$

$$\Delta\tau_2 = \frac{\{180^\circ - 2[\arctg(B/2H)]^\circ\}}{360^\circ f} \quad (11)$$

Визначені величини часових затримок є причиною виникнення адитивних похибок вимірювання товщини і швидкості розповсюдження УЗ

коливань в матеріалі об'єкта. Для усунення цих похибок виконаємо корегування значень часових затримок:

$$\begin{aligned} \tau_{1K} &= \tau_1 - \Delta\tau_1, \\ \tau_{2K} &= \tau_2 - \Delta\tau_2. \end{aligned} \quad (12)$$

Точність корекції часової затримки τ_2 не вимагає знання фактичної величини товщини об'єкта H . Як показують результати аналізу, навіть 10 % неточності цієї величини не спричинять похибку подальшого визначення фактичної товщини і швидкості ультразвуку більш, як 0,01 % при товщині об'єкта контролю $H > 25$ мм та частоті коливань $f > 5$ МГц.

Таким чином, значенням товщини і УЗ швидкості відповідатимуть вирази:

$$H = \frac{\tau_{1K} B}{2\sqrt{\tau_{2K}^2 - \tau_{1K}^2}}, \quad (13)$$

$$C = \frac{2H}{\tau_{1K}} = \frac{B}{\sqrt{\tau_{2K}^2 - \tau_{1K}^2}} \quad (14)$$

Висновки

Описаний у роботі метод прецизійного вимірювання часових затримок та швидкості УЗ коливань немає обмежень щодо типів хвиль і частоти цих коливань та середовищ їх розповсюдження. Цей метод може з успіхом використовуватися для аналогічних досліджень як твердих тіл, так і рідин та газоподібних середовищ. Визначенням часових затримок та швидкості УЗ коливань у рідких продуктах можемо вимірювати концентрацію розчинів при контролі газоподібних середовищ, наприклад, повітря, виявляти щонайменші його забруднення. Даний метод може знайти застосування при реалізації УЗ вимірювання витрат рідких та газоподібних продуктів при їх транспортуванні та при реалізації технологічних процесів.

1. Stamm H. An Overview of the Ultrasonic Detection of Creep Damage // The European J. of Non-Destructive Testing. – 1992. – 1, № 4.
2. Allan D. R., Cooper W.H.B. A Fourier Transform Technique that measuring Phase Delay between Ultrasonic Impulses with sufficient Accuracy to determine residual Stress in Metals // NDT International. – 1983. – 16, № 4.
3. Маєвський С. М. Вимірювання фазової швидкості ультразвуку як спосіб визначення напружень та утоми конструкційних матеріалів // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2009. – № 3. – С. 51–55.

Keywords: material stresses state, cumulative phase shifts, material structure defects

Поступила в редакцию
05.03.2015