

УДК 620.179.16

В.М. Мокійчук, О.В. Монченко

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ТОВЩИНИ ЛУНОІМПУЛЬСНИМ МЕТОДОМ

У статті розглянуто луноімпульсний метод ультразвукової товщинометрії та наведено методику оцінювання невизначеності для даного методу. Розглянуто джерела невизначеності, побудовано бюджет невизначеності, оцінено складові невизначеності та їх внесок в загальну невизначеність.

Ключові слова: ультразвукова луноімпульсна товщинометрія, невизначеність, об'єкт контролю.

Вступ

Концепція невизначеності [1, 2] при опрацюванні результатів вимірювань на сьогодні набула достатнього поширення, але в неруйнівному контролі (НК) такий підхід до оцінки точності вимірювань ще не набув належного поширення. Отже, метою статті є застосування методів оцінювання невизначеності вимірювання в неруйнівному контролі (НК).

Основний матеріал

В задачі НК входять пошук дефектів, вимірювання розмірів дефектів, аналіз структури або вимірювання товщини об'єктів контролю (ОК). ОК можуть бути метали, неметали, композиційні матеріали, біологічні об'єкти тощо.

Найбільш поширеними методами НК є ультразвукові вимірювання, вони займають основне місце серед неруйнівних методів завдяки своїй простоті, універсальності, економічності та точності. Методи ультразвукового контролю дуже різноманітні. Вони застосовуються для вирішення широкого кола задач в промисловості, науці, медицині тощо. Обмежимо розгляд методики оцінювання невизначеності на ультразвукову товщинометрію.

Найпоширенішим методом ультразвукової товщинометрії (УЗТ) є луноімпульсний метод.

Стисло методика розрахунку невизначеності для луноімпульсного методу представлена в роботі [3], а в даній роботі представлений детальний опис методики оцінювання невизначеності луноімпульсним методом з урахуванням калібрування, оскільки 90% сучасних товщиномірів мають у складі еталони.

Загальна схема вимірювання луноімпульсним методом показана на рис. 1, а структура сигналів УЗТ – на рис. 1, б.

Зондуючий ультразвуковий сигнал вводиться в ОК за допомогою п'єзоелектричного перетворюю-

вача (ПЕП) через певні проміжки часу T – період випромінювання. Цей сигнал проходить через шар контактної рідини (вода, машинне масло, гліцерин тощо), а в деяких випадках і через ультразвукову лінію затримки (УЛЗ), шар ОК, відбивається від протилежної поверхні ОК, повертається до ПЕП і формує 1-ий відбитий сигнал. Часовий інтервал між зондуєчим і першим відбитим імпульсами включає час τ поширення ультразвуку на відстань $2h$, $\tau_{к.р.}$ – час поширення в шарі контактної рідини i , за наявності УЛЗ, час розповсюдження сигналу через УЛЗ $\tau_{у.л.з.}$. Часовий інтервал між суміжними відбитими сигналами дорівнює затримці поширення коливань лише в ОК. Тому з метою виключення похибки вимірювання, обумовленої зміною товщини шару контактної рідини та затримкою сигналу в УЛЗ, товщину ОК визначають за часовим інтервалом між найбільшими по амплітуді 1-м та i -м відбитими сигналами, де $i = 2, 3, \dots$. Тоді

$$h = \frac{c\tau_i}{2(i-1)} + \xi, \quad (1)$$

де τ_i – часова затримка між першим та i -м сигналами; ξ – випадкова похибка вимірювання.

В формулі (1) крім значення τ_i , що визначається через вимірювання, входить значення швидкості ультразвуку в матеріалі c . Значення c визначають або еталонним методом за допомогою калібрування

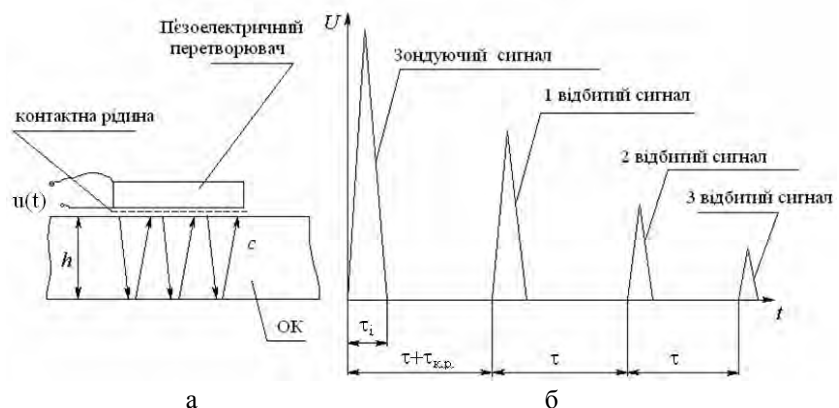


Рис. 1. Загальна схема луноімпульсного методу УЗТ: а – збудження та поширення ультразвуку в ОК; б – структура сигналів УЗТ

на зразках відомої товщини, або безеталонним методом, який передбачає утворення додаткового зразкового каналу і проведення вимірювань часу розповсюдження сигналів в цьому каналі. Також вважаємо, що випадкова похибка ξ має нульове математичне сподівання і відмінну від нуля дисперсію.

Ультразвукові товщиноміри [4], що реалізують луноімпульсний метод, зазвичай працюють в частотному діапазоні 500 кГц – 100 МГц. Вони орієнтовані на контроль виробів як з полірованими плоскопаралельними, так і з грубо обробленими поверхнями, поверхнями з корозією, ерозією, криволінійними поверхнями.

Найбільш поширений спосіб перетворення електричних коливань в ультразвукові базується на використанні п'єзоефекту [4]. Для різних задач товщинометрії, які відрізняються типом хвиль, кутом вводу, частотним діапазоном, геометричними розмірами ОК розроблена широка номенклатура ПЕП з різними акустичними характеристиками.

Низькочастотні ПЕП зазвичай використовуються при необхідності поліпшити проникнення ультразвуку у вироби великої товщини, контролі матеріалів з високим загасанням ультразвуку. Високочастотні ПЕП застосовують для підвищення роздільної здатності в задачах вимірювання товщини ОК малих розмірів.

У випадку вимірювання товщини в діапазоні від 0,05 до 10 мм використовуються широкосмугові суміщені ПЕП з УЛЗ. Для діапазону товщини від 3 до 1000 мм використовують роздільно-суміщені ПЕП із стандартною смугою пропускання.

Луноімпульсні ультразвукові товщиноміри за способами визначення швидкості ультразвукових коливань в ОК поділяються на:

- 1) еталонні (90%);
- 2) безеталонні (6%).

В еталонних товщиномірах (які містять зразки або еталони для попереднього калібрування) процес вимірювання товщини відбувається в два етапи: на першому виконується калібрування приладу за допомогою калібрувальних зразків (еталонів) відомої товщини, які виготовлені з того ж матеріалу, що і ОК, на другому етапі виконується вимірювання τ_i і, власне визначення товщини $2h$. Такий спосіб застосовано в більшості товщиномірів, розрахованих на роботу в діапазоні від десятків мікрометрів до декількох метрів [4]. На способи визначення c впливають частота випромінювача та значення приписане еталону (або зберігається у товщиномірі).

Постановка задачі. Виконуються вимірювання товщини одношарового ОК луноімпульсним методом з попереднім калібруванням товщиноміра. За результатами вимірювання часу τ поширення ультразвукової хвилі в ОК визначається його товщина h , згідно (1). Необхідно оцінити невизначеність вимірювання величини h .

На першому етапі оцінювання невизначеності, проаналізувавши вираз (1) побудуємо **діаграму Ішикави** [1], рис. 2.

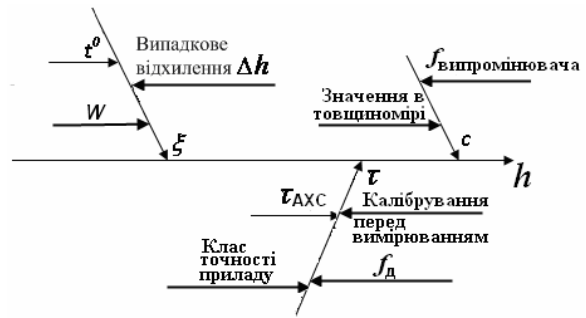


Рис. 2. Діаграма Ішикави для вимірювання товщини одношарового ОК

Наступним етапом є **формування бюджету невизначеності для луноімпульсного методу УЗТ** з урахуванням попереднього калібрування (табл. 1).

При складанні бюджету невизначеності передбачалося, що випадкові складові невизначеності є некорельованими.

Отримаємо вираз для оцінювання комбінованої невизначеності. Для розглянутого прикладу:

$$u_h = \sqrt{\left(\frac{c}{2} u_\tau\right)^2 + \left(\frac{\tau}{2} u_c\right)^2 + u_\xi^2}. \quad (2)$$

Діаграма Ішикави та представлена таблиця бюджету були розроблені за результатами аналізу компонент невизначеності луноімпульсного методу ультразвукової товщинометрії. Розглянемо ці компоненти.

1. Аналіз швидкості проходження ультразвукової хвилі в товщині ОК.

1.1. c_1 – швидкість проходження ультразвукової хвилі в товщині матеріалу.

Швидкість поширення поздовжніх хвиль зі швидкістю c в певному матеріалі залежить від багатьох факторів, зокрема хімічної чистоти матеріалу. Значення швидкості поширення ультразвукових хвиль в різних матеріалах визначаються за довідниковими даними і зберігаються у пам'яті товщиноміра.

У випадку, коли наявна інформація про верхню c_v і нижню c_n межі швидкості, можна вважати, що швидкість c_1 як випадкова величина, має рівномірний закон розподілу [5, 6].

Отже відповідну стандартну невизначеність можна оцінити як:

$$u_{c_1} = \frac{c_v - c_n}{2\sqrt{3}}. \quad (3)$$

1.2. Частота ПЕП впливає на значення швидкості проходження ультразвукової хвилі в товщині ОК c_2 . Частота випромінювача подана в паспорті приладу. Закон розподілу c_2 вважаємо рівномірним.

Таблиця 1

Бюджет невизначеності для визначення товщини ОК для луноімпульсного методу

№ з/п	Величина	Впливовий фактор	Тип оцінювання	Закон розподілу	Стандартна невизначеність	Комбінована невизначеність	Коефіцієнт впливу
1.1	c	c ₁ – швидкість проходження ультразвукової хвилі в товщині матеріалу	B	Рівномірний	$u_{c_1} = \frac{c_B - c_H}{2\sqrt{3}}$	$u_c^2 = u_{c_1}^2 + u_{c_2}^2$	$\frac{\tau}{2}$
1.2		c ₂ – швидкість ультразвукової хвилі, спричинена частотою випромінювача	B	Рівномірний	u_{c_2}		
2.1	τ	τ ₁ – форма амплітудної характеристики сигналу (АХС)	B	Нормальний	$u_{\tau_1} = \frac{\sigma_{ш}}{S}$	$u_{\tau}^2 = u_{\tau_1}^2 + u_{\tau_2}^2 + u_{\tau_3}^2 + u_{\tau_4}^2$	$\frac{c}{2}$
2.2		τ ₂ – частота дискретизації f _д	B	Рівномірний	$u_{\tau_2} = \frac{1}{f_d 2\sqrt{3}}$		
2.3		τ ₃ – калібрування приладу перед вимірюванням	B	Трикутний	$u_{\tau_3} = u_{\tau_{зразка}}$		
2.4		τ ₄ – клас точності приладу γ	B	Нормальний	$u_{\tau_4} = \frac{\tau_{ном} \gamma}{100 \cdot 2}$		
3.1	ξ	ξ _t – температура	B	Рівномірний	$u_{\xi_1} = u_t$	$u_{\xi}^2 = u_{\xi_1}^2 + u_{\xi_2}^2 + u_{\xi_3}^2$	1
3.2		ξ _W – вологість	B		$u_{\xi_2} = u_W$		
3.3		ξ _{Δh} – випадкове відхилення товщини	A		$u_{\xi_3} = \sigma_{\Delta h}$		

2. Невизначеність, обумовлена похибкою вимірювання часової затримки

Невизначеність вимірювання часу затримки має чотири статистично незалежні складові:

2.1. Невизначеність, обумовлена неточністю вимірювання початку і кінця часового надходження інтервалу обвідних ультразвукових імпульсів при прозвучуванні ОК. Така невизначеність зумовлена формою АХС і оцінюється за формулою (тип В):

$$u_{\tau_1} = \frac{\sigma_{ш}}{S}, \tag{4}$$

де σ_ш – СКЗ шуму на вході компаратора (В); S – крутість АХС (В/с).

Закон розподілу цієї складової нормальний.

2.2. Невизначеність, обумовлена частотою дискретизації сигналів в аналого-цифровому перетворювачі (АЦП) (тип В). Враховуючи рівномірний закон розподілу ймовірності цієї складової похибки її СКЗ визначається як:

$$u_{\tau_2} = \frac{1}{f_d 2\sqrt{3}}, \tag{5}$$

де f_д – частота дискретизації АЦП.

Закон розподілу – рівномірний.

2.3. Невизначеність, зумовлена калібруванням приладу перед вимірюванням:

$$u_{\tau_3} = u_{\tau_{зразка}}. \tag{6}$$

Ця складова обумовлена невизначеністю значення τ приписаного зразку u_{τ_{зразка}}.

Закон розподілу – трикутний.

2.4. Невизначеність, зумовлена класом точності приладу γ. У випадку, якщо γ задана як максимально допустима зведена похибка, то

$$u_{\tau_4} = \frac{\tau_{ном} \gamma}{100 \cdot 2}. \tag{7}$$

Закон розподілу – нормальний.

З урахуванням некорельованості складових похибки визначення τ, її комбінована невизначеність, враховуючи (4)-(7) представлена виразом:

$$u_{\tau} = \sqrt{u_{\tau_1}^2 + u_{\tau_2}^2 + u_{\tau_3}^2 + u_{\tau_4}^2}. \tag{8}$$

3. Невизначеність, зумовлена випадковими чинниками.

3.1. Невизначеність, зумовлена зміною температури t навколишнього середовища.

Для оцінювання цієї складової невизначеності необхідно враховувати коефіцієнт лінійного розширення матеріалу, який являється довідниковою величиною. Наприклад, для алюмінію α_{Al} = 22,2 °C⁻¹. Якщо вимірювання проводяться у нормальних умовах від t_{мін} до t_{макс}, то

$$u_t = \frac{(t_{макс} - t_{мін}) \cdot \alpha_{Al} \cdot h}{2\sqrt{3}}, \quad u_{\xi_1} = u_t, \tag{9}$$

3.2. Невизначеність, зумовлена зміною вологості навколишнього середовища.

Якщо проводиться вимірювання не гігроскопічних матеріалів, то цю складову невизначеності можна не враховувати. При проведенні вимірювань в нормальних умовах вважаємо, що ця складова врахована в класі точності приладу:

$$u_{\xi 2} = u_W . \quad (10)$$

3.3. Невизначеність, зумовлена випадковим відхиленням товщини ОК.

Для врахування невизначеності, зумовленої випадковим відхиленням товщини ОК та інших неврахованих чинників проводимо багаторазові вимірювання в різних точках ОК. Стандартна невизначеність буде визначена як відповідне стандартне відхилення:

$$u_{\xi 3} = \sigma_{\Delta h} . \quad (11)$$

Комбінована невизначеність випадкової похибки вимірювання з урахуванням (9)-(11) буде представлена так:

$$u_{\xi} = \sqrt{u_{\xi 1}^2 + u_{\xi 2}^2 + u_{\xi 3}^2} . \quad (12)$$

Закон розподілу у всіх впливаючих факторів випадкової похибки – рівномірний.

Для експериментального дослідження наведених положень був проведений експеримент вимірювання товщини $h = 10$ мм алюмінієвої пластини зі швидкістю поширення ультразвукової хвилі $c \cong 6350$ м/с на частоті $f_{\text{нес}} = 1,250$ МГц. За наведеною вище методикою оцінена невизначеність складала $u_h = 0,746 \cdot 10^{-6}$ м.

Також був оцінений внесок кожної складової невизначеності, який представлений діаграмою (рис. 3). З діаграми видно, що найбільший відсоток вносить невизначеність, зумовлена випадковими чинниками.

Висновок

В роботі подано детальний аналіз невизначеності для методу луноімпульсної товщинометрії. Побудовано діаграму Ішикави, наведено бюджет невизначеності та проаналізовано внесок складових невизначеності в загальну невизначеність по результа-

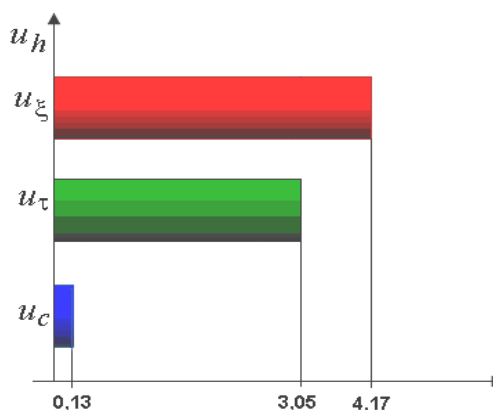


Рис. 3. Внесок складових в загальну невизначеність для методу луноімпульсної товщинометрії

тах експериментальних досліджень. Найменший внесок у сумарну невизначеність забезпечує невизначеність значення швидкості ультразвукової хвилі, яку можна у подальшому не враховувати.

Список літератури

1. *Uncertainty of measurement. Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995): ISO/IEC Guide 98-3:2008. – [Accepted 2008-09-30]. – Geneva : ISO, 2008. – 120 p. – (International standard).*
2. Ціделко В. Д. Невизначеність вимірювання. Обробка даних і подання результату вимірювання: монографія / В. Д. Ціделко, Н. А. Яремчук. – К.: ІВЦ Видавництво «Політехніка», 2002. – 176 с.
3. Використання концепції невизначеності в ультразвуковій товщинометрії / 19 міжнародная конференція и выставка «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики», 3-7 октября 2011, г. Гурзуф. – С. 84-87.
4. *Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, А. В. Ковалев и др.; под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.*
5. *Метрологічне забезпечення вимірювань та контролю: навч. посіб. / Є.Т. Володарський, В.В. Кухарчук, В.О. Поджаренко та ін. – Вінниця: ВЕЛЕС, 2001. – 219 с.*
6. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 278 с.

Надійшла до редколегії 10.01.2012

Рецензент: д-р техн. наук проф. Ю.В.Куц, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

ОЦЕНИВАНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ЭХО-ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

В.М. Мокийчук, Е.В. Монченко

В статье рассмотрен эхоимпульсный метод ультразвуковой толщинометрии и подана методика оценивания неопределенности для предложенного метода. Рассмотрены источники неопределенности, построен бюджет неопределенности, оценены составляющие неопределенности и их вклад в общую неопределенность.

Ключевые слова: ультразвуковая эхоимпульсная толщинометрия, неопределенность, объект контроля.

ESTIMATION UNCERTAINTY OF ECHO-IMPULSE THICKNESS MEASUREMENT

V.M. Mokiychuk, O.V. Monchenko

In article the ultrasonic thickness echo-impulse measurement method is considered and the technique of estimation of uncertainty for the offered method is submitted. Uncertainty sources are considered, the uncertainty budget is constructed, components of uncertainty and their contribution to the general uncertainty are estimated.

Keywords: ultrasonic thickness echo-impulse measurement method, uncertainty, test object.