

АНАЛІЗ СКЛАДОВИХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ РОЗМІРІВ ДЕФЕКТІВ СТИКОВОГО ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ТРУБ ДИФРАКЦІЙНО-ЧАСОВИМ МЕТОДОМ

С.М. Глабець, В.С. Єременко

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37. E-mail: s.glabets@gmail.com

Стаття присвячена аналізу складових невизначеності вимірювання розмірів дефектів стикового зварного з'єднання дифракційно-часовим методом (ДЧМ) ультразвукової дефектоскопії (УЗД). У роботі використовувались результати порівняльного дослідження R.S. Maunon та ін. щодо луна-імпульсного та дифракційно-часового методів стосовно виявлення та вимірювання розмірів дефектів і оцінки невизначеності вимірювань, де автори зосередились виключно на впливі відстані між перетворювачами. Нами було визначено максимально повний спектр факторів впливу, на основі якого побудовано діаграму Ішикави та сформовано відповідний бюджет невизначеності. Дослідження проводилося для ДЧМ УЗД стикового зварного з'єднання поліетиленових труб, але наведені підходи можуть бути застосовані для інших типів матеріалів. Бібліогр. 12, табл. 1, рис. 10.

Ключові слова: дифракційно-часовий метод, ультразвукова дефектоскопія, невизначеність вимірювань розмірів дефектів

Вступ. Для оцінки якості зварних з'єднань у процесі виготовлення та експлуатації широко використовуються ультразвукові методи неруйнівного контролю (УЗК), які дозволяють виявляти внутрішні дефекти та визначати їх розміри та координати. Класичний луна-імпульсний метод УЗК [1] використовує амплітуду відбитого від дефекту сигналу для оцінювання його розмірів, але це вимагає специфічного налаштування чутливості дефектоскопа (особливо блока часового регулювання підсилення) із застосуванням стандартних зразків. Точність цього методу суттєво залежить від типу дефекту, його орієнтації, методики сканування виробу та кваліфікації дефектоскопіста.

Точнішим для визначення розмірів дефектів є дифракційно-часовий метод ультразвукової дефектоскопії (ДЧМ УЗК), що ґрунтується на явищі дифракції ультразвукових хвиль від дефектів [2]. «Удар» ультразвукової хвилі по дефекту викликає генерацію краями дефекту сферично поширюваних ультразвукових хвиль. У ДЧМ реєструється

час приходу дифракційних хвиль від країв дефектів, тому амплітуда відбитого сигналу, а, відповідно, і орієнтація дефекту, не мають настільки критичного впливу, як у луна-імпульсному методі [3].

Для ДЧМ використовується пара ультразвукових похилих п'єзоперетворювачів (ПЕП) поздовжніх хвиль з широкою діаграмою направленості, розташованих на фіксованій відстані по різні боки зварного з'єднання. Загальна схема контролю зварного з'єднання за допомогою ДЧМ зображена на рис. 1. Один ПЕП (В) випромінює ультразвукову хвилю в об'єкт контролю (ОК), другий ПЕП (П) приймає дифракційні хвилі [4].

У загальному випадку на приймальному ПЕП отримують послідовно чотири характерних сигнали за часом приходу зі зміною фази на протилежну (рис. 2).

Позначенням на рис. 2 відповідають наступні сигнали [3]:

1. перший імпульс – пряме проходження підповерхневої поздовжньої хвилі;



Рис. 1. Схема контролю дифракційно-часовим методом

В.С. Єременко – <https://orcid.org/0000-0002-4330-7518>

© С.М. Глабець, В.С. Єременко, 2025

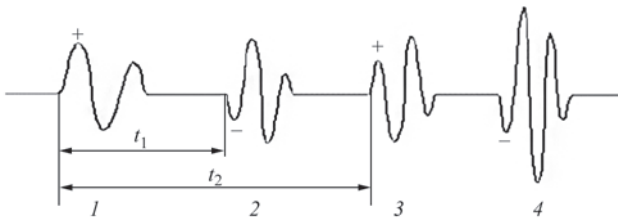


Рис. 2. Послідовність сигналів ДЧМ

2. другий імпульс – дифракційна хвиля від вершини дефекту, поздовжня, циркулярно розповсюджується в матеріалі, час приходу – t_1 ;

3. третій імпульс – дифракційна хвиля від нижнього краю дефекту, поздовжня, циркулярно розповсюджується, час приходу – t_2 ;

4. четвертий імпульс – хвиля відбиття від зворотної стінки виробу.

Наявність імпульсів від дифракційних хвиль свідчить про присутність несучільностей у зварному шві, а головними інформаційними характеристиками методу є час приходу цих дифракційних сигналів відносно першого імпульсу, що використовується для оцінювання глибини розташування та розміру несучільностей. У ДЧМ амплітуда сигналу для визначення розміру дефекту не використовується [3].

На сьогодні існують праці, присвячені оцінці невизначеності вимірювань розмірів дефектів дифракційно-часовим методом, але це оцінювання проводилося на основі опрацювання багаторазових вимірювань розмірів у цілому, без аналізу окремих складових сумарної невизначеності [1].

Мета роботи – наведення методики оцінювання невизначеності вимірювання розмірів дефектів ДЧМ з урахуванням факторів, які впливають на точність результату вимірювання.

Виклад основного матеріалу. Схема вимірювання розміру дефекту ДЧМ представлена на рис. 3: S – відстань між перетворювачами; d_1 – відстань від поверхні до вершини дефекту; d_2 – відстань від поверхні до нижнього краю дефекту; t_0 – час затримки ультразвукових хвиль у призмах ПЕП; t_1 – час приходу хвилі від вершини дефекту; t_2 – час приходу хвилі від нижнього краю дефекту.

Розрахунок висоти дефекту h проводиться за наступною формулою:

$$h = d_2 - d_1 \quad (1)$$

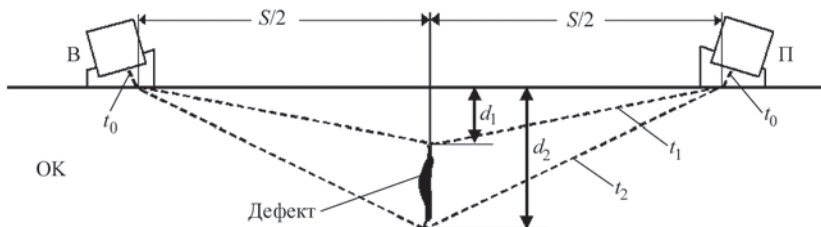


Рис. 3. Схема вимірювання розміру дефекту з використанням ДЧМ

Відстані від країв дефекту до поверхні d_1, d_2 визначаються наступним рівнянням [5]:

$$d_{1,2} = \sqrt{\left(\frac{c}{2}\right)^2 \cdot (t_{1,2} - 2t_0)^2 - S^2} \quad (2)$$

де c – швидкість поздовжніх УЗ коливань у матеріалі ОК.

Комбінована невизначеність згідно з формулою (1) матиме наступний вигляд [6]:

$$u_h = \sqrt{u_{d1}^2 + u_{d2}^2 + u_{\eta}^2} \quad (3)$$

де u_{d1}, u_{d2} – невизначеності вимірювань відстані від країв дефектів до поверхні; u_{η} – випадкова складова, яка враховує відтворюваність методу, а також неперпендикулярність і несиметричність розташування дефекту у зварному шві.

Закон розподілу сумарної комбінованої невизначеності результату вимірювання висоти дефекту можна прийняти гауссовим, оскільки на результат вимірювання впливає досить велика кількість чинників. Тоді розширена невизначеність для довірчої ймовірності $p = 0,95$ буде складати $U_h = 2u_h$.

Як видно з наведених рівнянь, основний вклад у комбіновану невизначеність висоти дефекту вносять невизначеності вимірювання відстаней від країв дефекту до поверхні. Тому проведемо детальніший аналіз модельного рівняння непрямого вимірювання (2) та невизначеностей його складових: u_{t_0} – невизначеність часу затримки ультразвукового імпульсу в ПЕП; u_c – невизначеність значення швидкості ультразвукових коливань у матеріалі, що досліджується; $u_{t_{1/2}}$ – невизначеність вимірювання часу приходу дифракційних сигналів (t_1 та t_2); u_s – невизначеність встановлення відстані між перетворювачами; u_{ξ} – невизначеність, що характеризує повторюваність вимірювань.

Комбіновані невизначеності вимірювання відстаней до верхнього та нижнього краю дефекту з урахуванням всіх складових:

$$u_{d_{1,2}} = \sqrt{\left(\frac{\partial d_{1,2}}{\partial c} u_c\right)^2 + \left(\frac{\partial d_{1,2}}{\partial t_{1,2}} u_{t_{1,2}}\right)^2 + \left(\frac{\partial d_{1,2}}{\partial t_0} u_{t_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial d_{1,2}}{\partial S} u_s\right)^2 + u_{\xi}^2} \quad (4)$$

Відповідні коефіцієнти впливу для складових комбінованих невизначеностей згідно з формулою (4) визначаються як часткові похідні та розраховуються за наступними рівняннями:

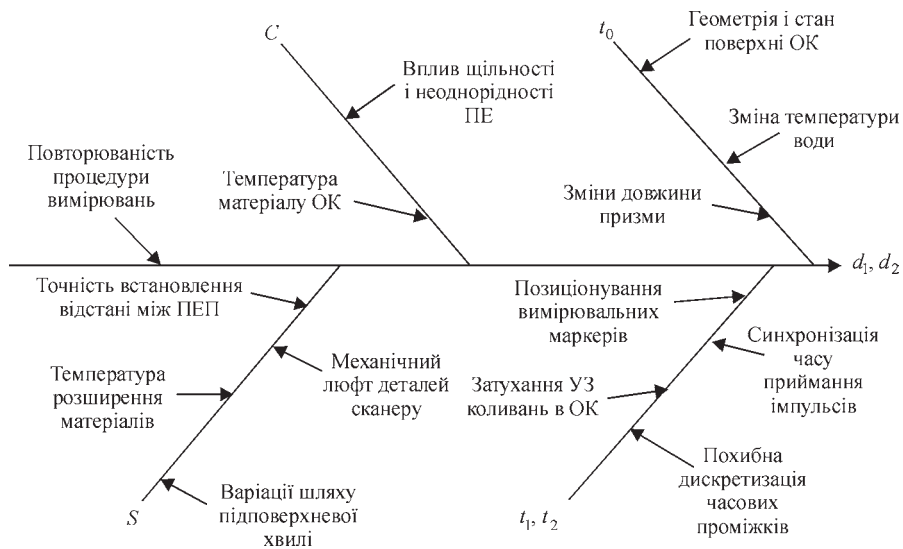


Рис. 4. Діаграма Ішкави для результату вимірювання відстаней d_1, d_2

$$\frac{\partial d_{1,2}}{\partial t_0} = \frac{-4c^2 t_1 - 8c^2 t_0}{4\sqrt{c^2 t_1^2 - 4c^2 t_1 t_0 + 4c^2 t_0^2 - 4S^2}} \quad (5)$$

$$\frac{\partial d_{1,2}}{\partial c} = \frac{2ct_1^2 - 8ct_1 + 8ct_0^2}{4\sqrt{c^2 t_1^2 - 4c^2 t_1 t_0 + 4c^2 t_0^2 - 4S^2}} \quad (6)$$

$$\frac{\partial d_{1,2}}{\partial t_1} = \frac{2ct_1^2 - 4c^2 t_0}{4\sqrt{c^2 t_1^2 - 4c^2 t_1 t_0 + 4c^2 t_0^2 - 4S^2}} \quad (7)$$

$$\frac{\partial d_{1,2}}{\partial S} = \frac{-2S}{\sqrt{c^2 t_1^2 - 4c^2 t_1 t_0 + 4c^2 t_0^2 - 4S^2}} \quad (8)$$

Для складових, які є аргументами модельного рівняння (2), побудовано діаграму Ішкави [7, 8] з подальшим розгалуженням на другорядні складові (рис. 4).

Бюджет невизначеності вимірювання висоти дефекту наведено в таблиці. При складанні бюджету невизначеності передбачалося, що складові комбінованої невизначеності є некорельованими величинами.

Проаналізуємо детальніше компоненти невизначеності, зазначені у таблиці.

1. Час затримки УЗ коливань у призмах ПЕП t_0 .

Для покращення співвідношення сигнал-шум у перетворювачах використовується призма з каналом, заповненим водою для введення та прийому УЗ коливань і одночасного забезпечення акустичного контакту (рис. 5).

З огляду на конструкцію такого перетворювача, t_0 залежить від:

1.1. Зміни довжини призми $L_{пр}$ (часу проходження УЗ коливань у водяному каналі призми) за рахунок зміни товщини еластичного ущільнювача в залежності від зношення та сили притискання перетворювача до поверхні ОК. Для мінімальної $L_{пр \min}$ і максимальної $L_{пр \max}$ довжини призми, розрахунок відповідного часу у водяному каналі призми

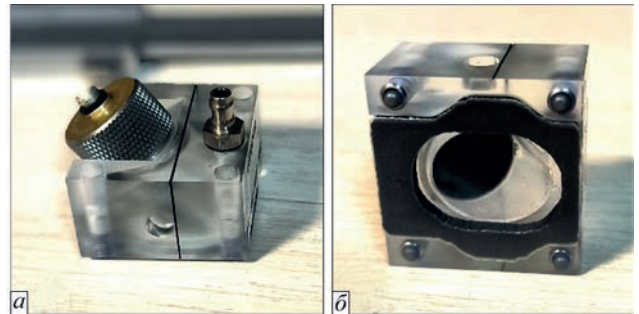


Рис. 5. ПЕП з призмою з водяним каналом і еластичним ущільнювачем: зовнішній вигляд (а), вид з контактної поверхні (б)

$t_0(L_{пр \min})$ і $t_0(L_{пр \max})$ і з урахуванням швидкості УЗ коливань у воді c_B виконується за формулою:

$$t_0 = \frac{L_{пр}}{c_B} \quad (10)$$

За отриманими максимальним і мінімальним значеннями шляху у призмі оцінюємо стандартну невизначеність, приймаючи рівномірний закон розподілу:

$$u_{t_01} = \frac{t_0(L_{пр \max}) - t_0(L_{пр \min})}{2\sqrt{3}} \quad (11)$$

Визначено експериментальним шляхом $L_{пр} = 10,3 \dots 10,5 - 11,8 \dots 12,0$ мм і відповідно $t_0 = 0,691 \dots 0,805$ мкс.

1.2. Зміни швидкості поздовжніх УЗ коливань у воді від її температури $c_B(T)$. Згідно з графіком залежності швидкості від температури (рис. 6) визначаються максимальна $c_B(T_{\max})$ і мінімальна $c_B(T_{\min})$ швидкості для робочого діапазону температур і розраховується максимальне й мінімальне значення часу затримки у призмі за формулою, що аналогічна до (11). Для рівномірного закону розподілу стандартна невизначеність оцінюється:

Бюджет невизначеності вимірювання висоти дефекту

Величина	Фактори впливу	Тип оцінювання	Закон розподілу	Стандартна невизначеність	Комбінована невизначеність	Коефіцієнт впливу
t_0	Довжина призми	B	Рівномірний	$u_{t_{01}} = \frac{t_0(L_{\max}) - t_0(L_{\min})}{2\sqrt{3}}$	$u_{t_0} = \sqrt{u_{t_{01}}^2 + u_{t_{02}}^2 + u_{t_{03}}^2}$	$\frac{\partial d_{1,2}}{\partial t_0}$ (5)
	Варіація швидкості УЗ коливань у воді від температури	B	Рівномірний	$u_{t_{02}} = \frac{t_0(T_{\min}) - t_0(T_{\max})}{2\sqrt{3}}$		
	Геометрія та стан поверхні ОК	A	Гаусса	$u_{t_{03}} = \sigma_g$		
c	Варіація швидкості УЗ коливань ОК	B	Рівномірний	$u_{c1} = \frac{c_{\text{MATmax}} - c_{\text{MATmin}}}{2\sqrt{3}}$	$u_c = \sqrt{u_{c1}^2 + u_{c2}^2}$	$\frac{\partial d_{1,2}}{\partial c}$ (6)
	Вплив температури матеріалу ОК	B	Рівномірний	$u_{c2} = \frac{c_{\text{MAT}}(T_{\max}) - c_{\text{MAT}}(T_{\min})}{2\sqrt{3}}$		
t_d (t_1, t_2)	Позиціонування вимірювальних маркерів	A		$u_{t_{d1}} = \sigma_{\text{ОП}}$	$u_{t_d} = \sqrt{u_{t_{d1}}^2 + u_{t_{d2}}^2 + u_{t_{d3}}^2 + u_{t_{d4}}^2}$	$\frac{\partial d_{1,2}}{\partial t_{1,2}}$ (7)
	Калібрування приладу	B	Сімпсона	$u_{t_{d2}} = u_{\text{зразка}}$		
	Шум і затухання УЗ коливань у матеріалі ОК	B	Гаусса	$u_{t_{d3}} = \frac{\sigma_{\text{ш}}}{2\alpha_s}$		
	Дискретність вимірювань часових проміжків	B	Рівномірний	$u_{t_{d4}} = \frac{1}{f_d 2\sqrt{3}}$		
S	Похибка вимірювань відстані між ПЕП	B	Гаусса	$u_{S1} = \frac{S_{\text{ном}} \gamma}{100}$	$u_S = \sqrt{u_{S1}^2 + u_{S2}^2 + u_{S3}^2 + u_{S4}^2}$	$\frac{\partial d_{1,2}}{\partial S}$ (8)
	Механічний люфт деталей сканера	B	Рівномірний	$u_{S2} = \frac{\Delta_{\text{МЛ}}}{2\sqrt{3}}$		
	Температурне розширення матеріалів	B	Рівномірний	$u_{S3} = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{2\sqrt{3}}$		
	Варіації шляху підповерхневої хвилі	A		$u_{S4} = \sigma_{\Delta S}$		
ξ	Повторюваність процедури вимірювань	A		u_{ξ}		

$$u_{t_{02}} = \frac{t_0(T_{\min}) - t_0(T_{\max})}{2\sqrt{3}} \quad (12)$$

Для діапазону робочих температур $T = 0 \dots 40$ °C швидкість УЗ коливань у воді змінюється від 1405 до 1530 м/с.

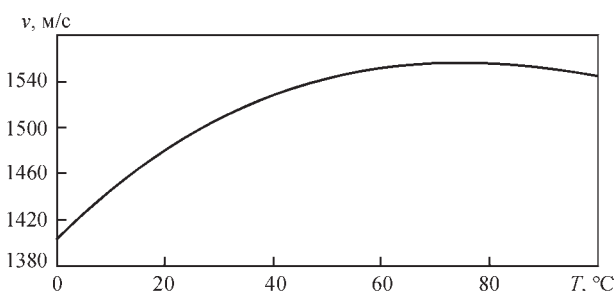


Рис. 6. Залежність швидкості ультразвукових хвиль від температури у воді [9]

1.3. Впливу геометрії ОК і стану поверхні на якість акустичного контакту (різний діаметр труб, шорсткість контрольованої поверхні). Невизначеність, зумовлена цими факторами, оцінюється за типом А (за результатами експерименту) як відповідне стандартне відхилення σ_g . У межах одного зварного з'єднання змінюється незначно:

$$u_{t_{03}} = \sigma_g \quad (13)$$

2. Швидкість поздовжніх УЗ коливань у матеріалі ОК с. Невизначеність, обумовлена зміною значень швидкості УЗ коливань у матеріалі ОК, має дві компоненти:

2.1. Варіація швидкості УЗ коливань c_{MAT} (довідкове значення), зумовлена характеристиками матеріалу – нерівномірністю його щільності та

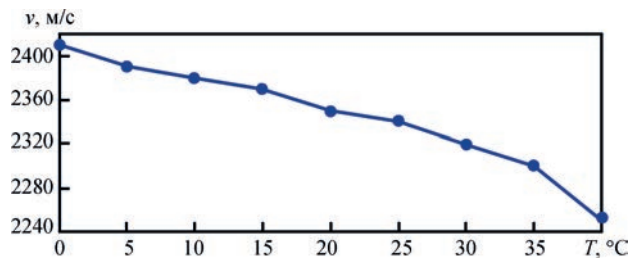


Рис. 7. Залежність швидкості поздовжніх ультразвукових хвиль в поліетилені від температури [10]

структури, пов'язаної зі способом виготовлення. Згідно з довідковими даними для поліетилену $c_{MAT} = 2150...2500$ м/с. Експериментальне значення, отримане для поліетилену при температурі 20 °C, становить: $c_{MAT} = 2450$ м/с. Згідно з [7] варіація швидкості УЗ хвиль у матеріалах ОК є одним з найзначущих чинників у невизначеності вимірювань розмірів дефекту:

$$u_{c1} = \frac{c_{MAT\ max} - c_{MAT\ min}}{2\sqrt{3}} \quad (14)$$

2.2. Вплив температури матеріалу ОК на швидкість УЗ коливань c_{MAT} . Швидкість поздовжніх УЗ коливань у поліетилені залежить від його температури T , $c_{MAT}(T)$. Згідно з графіком залежності швидкості в поліетилені від температури на рис. 7 визначаємо максимальне та мінімальне значення для наперед заданого робочого діапазону температур (для діапазону температур 0...40 °C отримуємо розкид $c_{MAT} = 2410...2250$ м/с). Для рівномірного закону розподілу стандартну невизначеність оцінюємо як:

$$u_{c2} = \frac{c_{MAT}(T_{max}) - c_{MAT}(T_{min})}{2\sqrt{3}} \quad (15)$$

3. Час приходу дифракційних хвиль від верхнього та нижнього країв дефекту t_1 і t_2 відповідно. На невизначеності впливають наступні чинники:

3.1. Точність позиціонування вимірювальних маркерів. Вимірювальні маркери розташовуються оператором вручну на початку першої півхвилі сигналу від дефекту на В-скан розгортці. Позитивна та негативна півхвилі відображені градаціями білого та чорного кольору відповідно (рис. 8). Відсутність чітких контурів і рівень кваліфікації опе-

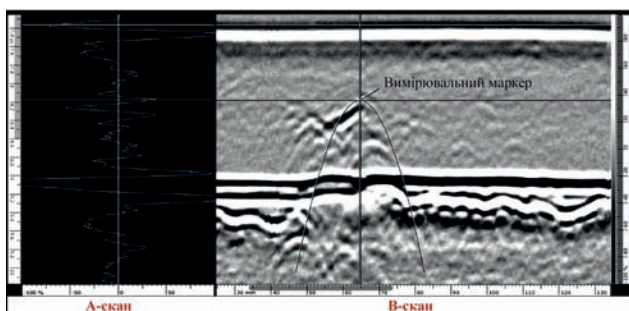


Рис. 8. А-скан і В-скан результатів сканування ДЧМ з дефектом і вимірювальним маркером

ратора впливає на точність розташування маркерів. Для визначення впливу зазначеного фактору проводиться серія повторних процедур розміщення вимірювальних маркерів з розрахунком СКВ результатів $\sigma_{оп}$ (оцінка за типом А).

3.2. Невизначеність калібрування приладу перед проведенням контролю. Калібрування виконується на стандартних зразках відомої товщини, виготовлених із матеріалу, що відповідає матеріалу ОК згідно з рекомендаціями [2]. Невизначеність калібрування буде оцінюватися невизначеністю стандартного зразка $u_{t_{д2}} = u_{зразка}$.

3.3. Співвідношення сигнал-шум у прийнятому сигналі впливає на точність вимірювання часових інтервалів. У зв'язку з тим, що ДЧМ, на відміну від луна-імпульсного методу, не є амплітудним, вимірювання часових інтервалів T не прив'язано до фіксованого рівня амплітудної характеристики сигналу. При контролі матеріалів з великим коефіцієнтом затухання УЗ коливань спостерігається високий рівень шуму (рис. 9). Рівень шуму умовно позначено штриховою лінією. Кут нахилу переднього фронту огинаючої корисного сигналу також залежить від затухання та структури матеріалу. За умови ослабленого сигналу та високого рівня шумів може бути втрачено від половини першого періоду до декількох періодів корисного сигналу. Пов'язана з цим затримка у часі позначена як ΔT [6].

Цю невизначеність, обумовлену кутом нахилу переднього фронту або «крутістю» [11], тобто амплітудною характеристикою сигналу, можемо оцінити за формулою:

$$u_{t_{д3}} = \frac{\sigma_{ш}}{2\alpha_s} \quad (16)$$

де $\sigma_{ш}$ – середньоквадратичне значення шуму сигналу; α_s – крутість АХС (В/с).

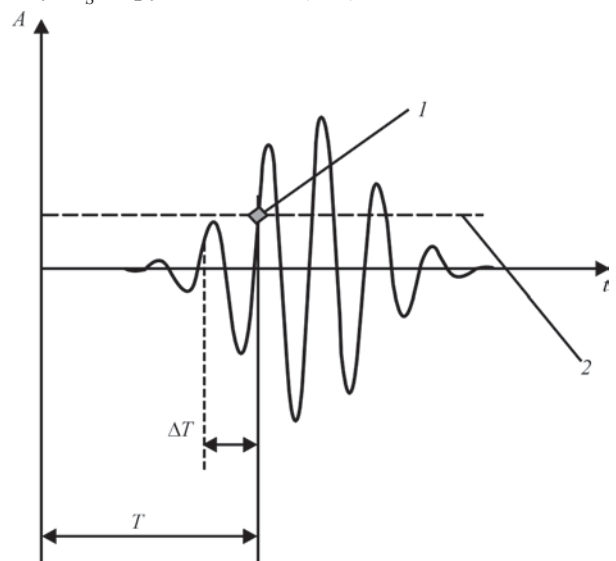


Рис. 9. Корисний сигнал на рівні шуму : 1 – момент вимірювання часу приходу корисного сигналу, 2 – рівень шуму

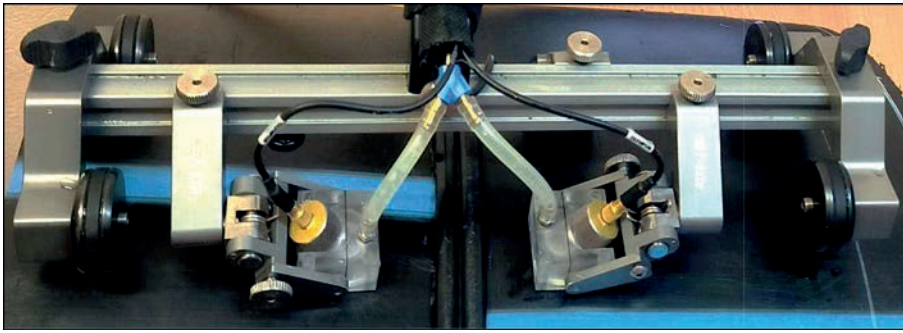


Рис. 10. Розташування сканера із встановленими ПЕП і призмами на ОК

Довідкові дані затухання УЗ коливань у поліетилені становлять 0,3 дБ/мм на частоті $f=2,25$ МГц [10]. Експериментально отримані дані затухання УЗ коливань становлять 0,7 дБ/мм на частоті $f=2,25$ МГц. Згідно з даними [12] у поліетилені також спостерігається високий рівень шуму. Співвідношення сигнал-шум (SNR) може досягати значення 9:1.

3.4. Невизначеність, обумовлена похибкою дискретизації часових інтервалів, визначається частотою дискретизації конкретного дефектоскопа, зазвичай складає 100 МГц. Складова похибки визначається частотою дискретизації сигналів f_d в АЦП. За умови рівномірного закону розподілу:

$$u_{t_{\text{дн}}} = \frac{1}{f_d 2\sqrt{3}} \quad (17)$$

4. Відстань між перетворювачами S. Невизначеність обумовлена наступними факторами:

4.1. Невизначеність точності встановлення відстані між ПЕП. u_s визначається класом точності вимірювального інструменту γ , який використовувався при виготовленні скануючого пристрою, тобто максимально допустимою зведеною похибкою з нормальним законом розподілу, отже:

$$u_{s1} = \frac{S_{\text{ном}} \cdot \gamma}{100} \quad (18)$$

4.2. Невизначеність, обумовлена механічним люфтом деталей сканера $\Delta_{\text{мл}}$:

$$u_{s2} = \frac{\Delta_{\text{мл}}}{2\sqrt{3}} \quad (19)$$

4.3. Невизначеність, обумовлена температурним розширенням матеріалів і складається з наступних чинників:

4.3.1. Температурне розширення сталевих деталей сканера впливає на відстань між перетворювачами (рис. 3). Сталь має коефіцієнт теплового розширення 0,012 мм/°С. Для діапазону робочих температур 0...40 °С отримаємо зміну відстані між ПЕП і значення $L_{\text{мін}}$ та $L_{\text{макс}}$ відповідно. Ця складова невизначеності u_{s3} визначається формулою:

$$u_{s3} = \frac{L_{\text{макс}} - L_{\text{мін}}}{2\sqrt{3}} \quad (20)$$

4.3.2. Температурне розширення ОК. Коефіцієнт теплового розширення поліетилену становить 0,2 мм/°С. Зміна температури матеріалу викликає зміну товщини стінки труби, що позначається на точності калібрування глибиноміра приладу. Невизначеність обчислюється за формулою як для сталі (20).

4.4. Збільшення шляху підповерхневої хвилі викликане огинанням поверхневих артефактів розміром, співставним або більше довжини хвилі. На неї також впливає: відмінність акустичних характеристик поверхневого шару матеріалу, механічні пошкодження поверхні, форма валика зварного з'єднання, увігнутість чи зміщення кромки труб. Ця складова невизначеності оцінюється за типом А.

5. Повторюваність процедури u_{ξ} зумовлена впливом таких факторів як:

- людський фактор при встановленні та центруванні сканера відносно шва (рис. 10);
- кваліфікація оператора під час налаштування приладу та виконання контролю;
- зміна умов контролю (різкі зміни температури, якість акустичного контакту тощо).
- інші фактори, вплив яких неможливо або нецільно виокремити та оцінити.

За наявності результатів багаторазових вимірювань та їх статистичної обробки ця складова невизначеності може бути суттєво зменшена.

Висновки

У роботі запропоновано методику опрацювання вимірювальної інформації при контролі стикових з'єднань дифракційно-часовим методом. За допомогою цієї методики проведено аналіз точності вимірювання розмірів дефектів у зварних з'єднаннях поліетиленових труб з урахуванням технічних характеристик обладнання, стану та особливостей об'єкту контролю, параметрів навколишнього середовища, кваліфікації дефектоскопіста. Особливу увагу приділено факторам, які не враховувалися іншими дослідниками. Визначено найсуттєвіші складові невизначеності вимірювання розмірів дефектів, на основі яких сформульовано та проаналізовано бюджет невизначеності.

Запропонований підхід можливо застосовувати для оцінки невизначеності вимірювань розмі-

рів дефектів ДЧМ у різних практичних ситуаціях, як для контролю поліетиленових, так і металевих зварних з'єднань.

Список літератури

1. Mayworm, R.C., Alvarenga, A.V. (2020) Costa-Felix R.P.B. A metrological approach to the time of flight diffraction method (ToFD). *Measurement*, **167**, 108298. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108298>
2. ДСТУ EN ISO 10863:2022 *Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Застосування дифракційно-часового методу (TOFD) (EN ISO 10863:2020, IDT; ISO 10863:2020, IDT).*
3. Boháčik, M., Mičian, M., Koňár, R., Hlavatý, I. (2017) Ultrasonic testing of butt weld joint by TOFD technique. *Manufacturing Technology*, **17(6)**, 842–847. DOI: <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2017/a/1213-2489/MT/17/6/842>
4. Глабеть С.М. (2024) *Можливість використання дифракційно-часового методу ультразвукового контролю для стикових зварних з'єднань поліетиленових труб.* Тези конференції EAIRP 2024. ПФФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського.
5. Moles, M., Robertson, L., Sinclair, T. (2012) Developments in Time-Of-Flight Diffraction (TOFD). In: *18th World Conference on Nondestructive Testing*, 16–20 April 2012, Durban, South Africa.
6. Babak, V., Babak, S., Kuts, Yu., Myslovykh, M., Scherbak, L., Zaporozhets, A. (2021) *Models and measures in measurements and monitoring.* Studies in Systems, Decision and Control. Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-70783-5>
7. Куц Ю.В., Монченко О.В., Бистра І.М. та ін. (2019) *Фазовий метод ультразвукової лунаїмпульсної товщинометрії виробів з конструкційних матеріалів: монографія.* Київ, Інтерсервіс.
8. Галаган Р.М., Єременко В.С. (2016) *Ультразвуковий контроль відкритої мікроскопічної пористості фарфорових ізоляторів: монографія.* Київ, НТУУ «КПІ».
9. Галаган Р.М. (2019) *Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю: підручник.* Київ, НТУУ «КПІ».
10. Qi, G., Li, Y., Ding, N. (2019) Measurement of acoustic basic parameters of polyethylene pipe. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, **677**, 022050. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/677/2/022050>
11. Мокійчук В.М., Монченко О.В. (2012) Оцінювання невизначеності вимірювання товщини луноімпульсним методом. *Системи обробки інформації*, **1**, 74–77.
12. Correia, C. (2017) TOFD Examination of HDPE butt weld fusion joints. *E-J. of Nondestructive Testing*. https://www.ndt.net/article/ndtnet/2017/1_Correia.pdf

References

1. Mayworm, R.C., Alvarenga, A.V. (2020) Costa-Felix R.P.B. A metrological approach to the time of flight diffraction method (ToFD). *Measurement*, **167**, 108298. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108298>
2. DSTU EN ISO 10863:2022. Non-destructive testing of welds. Ultrasonic inspection. Application of the diffraction-time method (TOFD) (EN ISO 10863:2020, IDT; ISO 10863:2020, IDT) [in Ukrainian].
3. Boháčik, M., Mičian, M., Koňár, R., Hlavatý, I. (2017) Ultrasonic testing of butt weld joint by TOFD technique. *Manufacturing Technology*, **17(6)**, 842–847. DOI: <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2017/a/1213-2489/MT/17/6/842>
4. Glabets, S.M. (2024) Possibility of using the diffraction-time method of ultrasonic inspection for butt welded joints of polyethylene pipes. In: *Abstracts of the EAIRP 2024 Conference*. PBF, NTUU «KPI» [in Ukrainian].
5. Moles, M., Robertson, L., Sinclair, T. (2012) Developments in Time-Of-Flight Diffraction (TOFD). In: *18th World Conference on Nondestructive Testing*, 16–20 April 2012, Durban, South Africa.
6. Babak, V., Babak, S., Kuts, Yu. et al. (2021) *Models and measures in measurements and monitoring.* Studies in Systems, Decision and Control. Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-70783-5>
7. Kuts, Y.V., Monchenko, O.V., Bystra, I.M. et al. (2019) *Phase method of ultrasonic echo-pulse thickness measurement of products from structural materials: Monograph.* Kyiv, Interservice [in Ukrainian].
8. Galagan, R.M., Eremenko, V.S. (2016) *Ultrasonic control of open microscopic porosity of porcelain insulators: Monograph.* Kyiv, NTUU KPI [in Ukrainian].
9. Galagan, R.M. (2019) *Theoretical foundations of ultrasonic nondestructive testing: A textbook.* Kyiv, NTUU KPI [in Ukrainian].
10. Qi, G., Li, Y., Ding, N. (2019) Measurement of acoustic basic parameters of polyethylene pipe. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, **677**, 022050. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/677/2/022050>
11. Mokiychuk V.M., Monchenko O.V. (2012) Estimation of uncertainty of thickness measurement by echo-pulse method. *Systemy Obrobky Informatsii*, **1**, 74–77 [in Ukrainian].
12. Correia, C. (2017) TOFD Examination of HDPE butt weld fusion joints. *E-J. of Nondestructive Testing*. https://www.ndt.net/article/ndtnet/2017/1_Correia.pdf

ANALYSIS OF UNCERTAINTY COMPONENTS OF DEFECT SIZE MEASUREMENT IN BUTT WELDED JOINT OF POLYETHYLENE PIPES BY TOFD METHOD

S.M. Hlabets, V.S. Eremenko

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.
E-mail: s.glabets@gmail.com

The paper is devoted to the analysis of the uncertainty components of measuring the size of defects in a butt welded joint by the diffraction-time method (DTM) of ultrasound detection (USD). Used in the work are the results of a comparative study by R.S. Mayworm et al. on echo-pulse and diffraction-time methods for detecting and measuring defect sizes and estimating measurement uncertainty, where the authors focused exclusively on the effect of the distance between the transducers. We have identified the fullest possible range of influencing factors, based on which we have built an Ishikawa diagram and formed an appropriate uncertainty budget. The study was carried out for DTM ultrasonography of butt welded joints of polyethylene pipes, but the approaches presented here can be applied to other types of materials. 12 Ref., 1 Tabl., 10 Fig.

Keywords: diffraction-time method, ultrasonic flaw detection, uncertainty of defect size measurements

Отримано 28.05.25

Отримано у переглянутому вигляді 13.06.25

Прийнято 22.09.25