

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2026-85-2>

УДК 620.179.16

ГЛАБЕЦЬ Сергій

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0009-0004-2740-9209>

s.glabets@gmail.com

ЄРЕМЕНКО Володимир

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0002-4330-7518>

nau_307@ukr.net

ВИКОРИСТАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ ДЛЯ СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ТРУБ

У роботі розглянуто особливості застосування ультразвукового контролю (УЗК) для стикових зварних з'єднань труб із поліетилену високої щільності (ПВЩ). Проаналізовано типові дефекти, що виникають у зварному шві, а також надано рекомендації сучасної нормативно-технічної документації, щодо вибору частоти перетворювачів при застосуванні фазованих антенних решіток (ФАР). Проведені експериментальні дослідження матеріалу труб діаметром 600–800 мм підтвердили значне затухання ультразвуку в ПВЩ і доцільність використання поздовжніх хвиль частотою 2,25 МГц. Застосування традиційних методів, зокрема луна-імпульсного (англ. pulse-echo), обмежено придатне для виявлення несплавлень та орієнтованих дефектів ПВЩ. Показано переваги дифракційно-часового методу (ДЧМ), який забезпечує високу чутливість до дефектів, стабільність вимірювань та незначну залежність від орієнтації дефектів. Отримані результати підтверджують перспективність використання ДЧМ як економічно доцільної альтернативи фазованим решіткам для неруйнівного контролю зварних з'єднань труб з ПВЩ.

Ключові слова: поліетилен високої щільності, ультразвуковий контроль, стикове зварювання, дифракційно-часовий метод, неруйнівний контроль.

HLABETS Serhii, EREMENKO Vladimir

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

APPLICATION OF ULTRASONIC TESTING TO BUTT-WELDED POLYETHYLENE PIPE JOINTS

The paper investigates the specific features and limitations of applying ultrasonic testing (UT) methods to the inspection of butt-welded joints of high-density polyethylene (HDPE) pipes, which are widely used in modern pipeline systems for water supply, gas distribution, and industrial applications. Special attention is paid to the structural and acoustic properties of HDPE that significantly affect ultrasonic wave propagation and complicate reliable defect detection.

Typical welding defects occurring in HDPE butt joints, including lack of fusion, voids, inclusions, and geometrically oriented discontinuities, are analyzed in detail. Current international and industry technical standards are reviewed with respect to the selection of ultrasonic transducer frequencies and inspection techniques, with a focus on phased array ultrasonic testing (PAUT). Based on experimental studies conducted on HDPE pipes with diameters ranging from 600 to 800 mm, a high level of ultrasonic attenuation inherent to polymer materials was confirmed. The results demonstrate that the use of longitudinal ultrasonic waves with a frequency of 2.25 MHz ensures an optimal balance between penetration depth and signal-to-noise ratio.

The study shows that the application of conventional ultrasonic methods, particularly the pulse-echo technique, has limited effectiveness in detecting lack of fusion and other planar or oriented defects in HDPE welds due to signal scattering and strong attenuation. In contrast, the advantages of the time-of-flight diffraction (TOFD) method are substantiated experimentally. TOFD provides enhanced sensitivity to defect tips, stable measurement results, and minimal dependence on defect orientation and surface geometry.

The obtained results confirm the high potential of TOFD as a reliable and cost-effective alternative to phased array ultrasonic techniques for the non-destructive testing of welded joints in HDPE pipes. The findings can be used to improve inspection procedures, optimize testing parameters, and enhance the overall reliability of polymer pipeline systems.

Keywords: high-density polyethylene, ultrasonic testing, butt welding, time-of-flight diffraction, non-destructive testing.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.01.2026

Прийнята до друку / Accepted 20.02.2026

Опубліковано / Published 05.03.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Глабєць Сергій, Єременко Володимир

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ

ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Використання трубопроводів із поліетилену високої щільності (ПВЩ) для заміни існуючих сталевих труб є важливим аспектом модернізації існуючої системи трубопроводів для транспортування води, технологічних рідин. Що у свою чергу зумовлює потребу у застосуванні ефективних методів контролю якості зварних з'єднань трубопроводів.

Порівняльний аналіз придатності традиційних методів неруйнівного контролю (НК) зварних з'єднань труб ПВЩ а також сучасний стан вимог до контролю якості надано в [1]. Ця робота присвячена практичним аспектам ультразвукового контролю саме труб з ПВЩ і особливостям, пов'язаним з контролем поліетилену.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

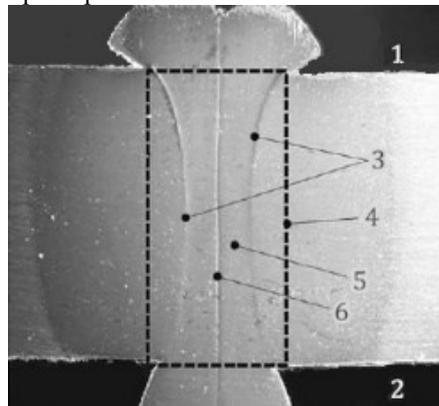
Розгляд наявних підходів з ультразвукового контролю зварних з'єднань і їх адаптація під особливості ПВЩ з урахуванням акустичних властивостей поліетиленових труб, специфіки технології зварювання і дефектів що виникають у зварному з'єднанні.

Для виконання мети будуть розглянуті наступні задачі:

- Аналіз типів дефектів і їх розташування
- Огляд рекомендацій в нормативно-технічній документації (НТД) щодо способів контролю і частоти перетворювачів
- Експериментальне дослідження стабільності характеристик та контролепридатності матеріалу.

Особливості зварних з'єднань ПВЩ

При зварюванні труб ПВЩ можуть виникати дефекти пов'язані з неякісною підготовкою зварюваних поверхонь і порушенням технології зварювання. На Рис 1 зображенні поперечний переріз зварного з'єднання труби з ПВЩ, цифрами позначені характерні зони шва.



Позначення:

1. Зовнішня сторона;
2. Внутрішня сторона;
3. Зона розплавлення;
4. Ділянка що контролюється;
5. Зона змішування матеріалу;
6. Зона з'єднання.

Рис. 1. Поперечний переріз зварного з'єднання

У зонах 1,2 можлива наявність поверхневих дефектів – нерівномірність форми валика витісненого матеріалу, пори, розтріскування (Рис.1). У зонах 3, 5 можливе утворення пор, присутність сторонніх включень. У межах зони 4 можлива наявність внутрішніх дефектів, зокрема тріщин. Як результат порушення технології зварювання у зоні з'єднання 6 можлива поява непроварів, несплавлення (злипання) [2].

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Для УЗК зварних з'єднань сталевих труб найбільш поширеними є наступні методи: луна-імпульсний метод з використанням прямих і похилих п'єзоелектричних перетворювачів (ПЕП) поздовжньої та поперечної хвилі; контроль з використанням технології фазованих антенних решіток (ФАР); дифракційно-часовий метод парою похилих ПЕП поздовжньої хвилі [1].

Наразі в Україні відсутні діючі стандарти для контролю труб з ПВЩ ультразвуковими методами НК. Відповідно відсутні рекомендації стосовно типу застосованих хвиль, вибору частоти перетворювачів, чутливості. Згідно висновків [1] є доцільним дослідити ДЧМ для контролю зварних з'єднань ПВЩ труб аналізуючи напрацювання з інших ультразвукових методів для різних матеріалів .

У переліку міжнародних нормативних документів є 2 стандарти (технічні специфікації), що поки не імплементовані в Україні, які надають рекомендації для проведення неруйнівного контролю і оцінку якості труб з ПВЩ з використанням ФАР:

- ISO/TS 22499:2024 Thermoplastic pipes for the conveyance of fluids — Inspection of polyethylene butt fusion joints using phased array ultrasonic testing [3] - Термопластичні труби для транспортування рідин — Контроль стикових зварних швів поліетиленових труб з використанням ультразвукового контролю з ФАР.

- ISO/TS 16943:2023 Thermoplastic pipes for the conveyance of fluids — Inspection of polyethylene electrofusion socket joints using phased array ultrasonic testing [4] - «Термопластичні труби для транспортування рідин — Контроль зварних швів поліетиленових труб, виконаних електромуфтовим зварюванням з використанням ультразвукового контролю з ФАР.

Згідно з ISO/TS 22499:2024 рекомендовані частоти п'єзоелектричного перетворювача (ПЕП) в залежності від товщини стінки труб представлені в табл. 1 [3].

Таблиця 1

Вибір частоти перетворювача за ISO/TS 22499:2024

Рекомендована частота, МГц	Товщина стінки, мм
1,0 до 2,25	60 до 100
2,25 до 4,0	30 до 60
4,0 до 5,0	5 до 30

Разом з тим ISO/TS 16943:2023 надає інші рекомендації, представлені в табл. 2 [4].

Таблиця 2.

Вибір частоти перетворювача за ISO/TS 16943:2023

Рекомендована частота, МГц	Товщина стінки муфти, мм
3,5	30-50
5,0	10-50
7,5	10-30

Необхідно зауважити що в ISO/TS 22499:2024 рекомендується використання поздовжніх (компресійних) хвиль [3]. Для виявлення дефектів різної орієнтації цей стандарт вказує на необхідність контролю або двома різними кутами вводу або з растровим скануванням (електронне керування кутом вводу) при односторонньому доступі. При використанні УЗК з ФАР виконується не менше 2 сканувань з'єднання – по одному проходу з кожної сторони шва.

Однак, надані рекомендації не забезпечують виявлення всіх можливих дефектів, необхідні подальші дослідження щодо можливості виявлення несплавлення (злипання).

Також, у зв'язку з високою вартістю та обмеженою доступністю обладнання для ультразвукового контролю з ФАР, є необхідність у більш економічних, але при цьому ефективних методів контролю.

При УЗК зварних з'єднань сталевих труб застосовують луна-імпульсний метод, і, згідно діючого стандарту, зварне з'єднання контролюють поперечною (зсувною) хвилею, прямим і однократно відбитим променем для виявлення несущільностей різної орієнтації [5]. У більшості випадків для луна-імпульсного УЗК необхідно 4 сканування шва - двома перетворювачами з різницею кута вводу не менше 10° з обох сторін шва.

Для УЗК ПВЩ як рекомендацію можна застосовувати вищезазначені дані з технології ФАР та луна-імпульсного УЗК сталевих труб але необхідно дослідити як можливість використання різних типів хвиль, так і способи реалізації широкого діапазону кутів вводу для виявлення дефектів різного типу і орієнтації.

Проведені дослідження

В Лабораторії неруйнівного контролю ТОВ "НВФ Діагностичні прилади" виконувались експерименти з ультразвукового контролю зразків товстостінних ПВЩ труб діаметрами 600 і 800 мм з товщиною стінки 30 – 50 мм.

Дослідження підтвердили що оптимальним є використання частоти ПЕП 2,25 МГц через суттєве затухання ультразвукових хвиль. Використання луна-імпульсного методу з поперечними хвилями майже неможливе з причини дуже слабкого збудження цього типу коливаль у частково аморфній структурі ПВЩ (Рис2). Співвідношення сигнал-шум для поздовжньої хвилі (1) не менше 16 dB, для поперечної хвилі (2) різниця сигнал-шум становить 2-4 dB, сигнал поперечної хвилі практично не виділяється на рівні шуму що не відповідає вимогам стандарту - мінімально необхідній різниці 6 dB [3]. Таким чином практична ідентифікація і використання поперечної хвилі неможливе без додаткових досліджень.

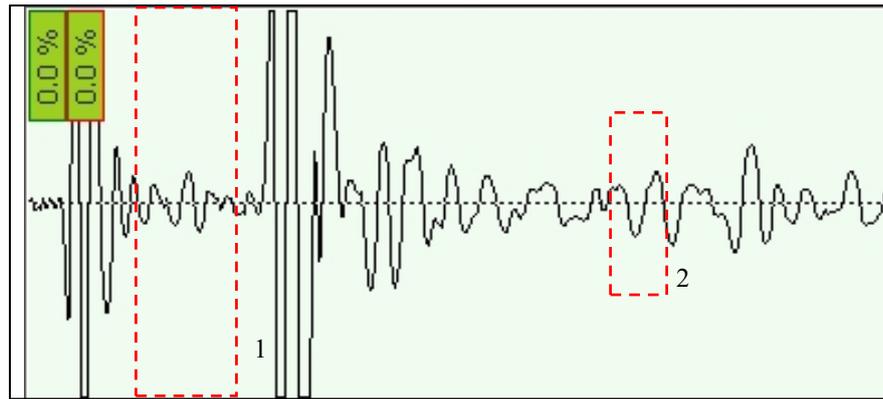


Рис. 2 Порівняння амплітуди поздовжньої (1) і поперечної (2) хвиль в ПВЩ

У зв'язку з високим затуханням поперечних ультразвукових хвиль в ПВЩ, луна-імпульсний УЗК практично обмежується прямим променем що різко знижує вірогідність виявлення локальних дефектів різної орієнтації. Для виявлення наявності непроварів або включень великого розміру можливе використання дзеркально-тіньового методу з парою ПЕП розташованих по різні боки з'єднання.

Для виявлення дефектів типу несплавлень або злипань ПВЩ, що орієнтовані в радіальному напрямку по лінії з'єднання, необхідним є використання похилих перетворювачів з великими кутами вводу. Проте певні ускладнення викликає введення ультразвуку під кутом в поліетилен з швидкістю коливань 2150 ... 2500 м/с. Стандартні ПЕП адаптовані для контролю металів не забезпечують введення УЗ коливань в поліетилен під необхідними кутами. Співвідношення швидкості ультразвукових коливань у оргскляній призмі ПЕП і поліетилені викликає заломлення променя в бік зменшення кута вводу.

Загалом з аналізу вищенаведених даних логічним є застосування саме ДЧМ з парою перетворювачів поздовжньої хвилі і спеціалізованих призм з водяним каналом, виробництва Olympus, що довели свою ефективність під час досліджень. Дефектоскопи що реалізують ДЧМ УЗК значно дешевші з причини використання одного каналу генератор-приймач на відміну від дефектоскопів з ФАР, в яких необхідно від 16 до 128 каналів.

Для розрахунку кута вводу поздовжніх коливань в ПВЩ було використано закон Снеліуса згідно методики наведеної у [6]. При введенні коливань з води у ПВЩ марки PE100 перший критичний кут (у призмі) склав $39,6^\circ$.

Застосування дифракційно-часового методу ультразвукового контролю є предметом порівняльних досліджень різних методів, що підтверджують ефективність використання цього методу [7].

Низька чутливість ДЧМ до орієнтації дефектів підтверджена дослідженнями згідно яких нахил дефекту незначно впливає на амплітуду дифрагованого сигналу - зменшення в межах 10 dB при зміні кута нахилу дефекту від 0 до 50° [8].

Контроль з використанням двох перетворювачів вимагає використання механічних пристроїв або сканера для дотримання паралельності і фіксованої відстані між ПЕП, а також стабільності акустичного контакту з поверхнею труби, що забезпечує покриття всього перерізу шва за один прохід. Для дослідження використовувався однокоординатний сканер HST-Lite виробництва Olympus, що забезпечує чітке позиціонування ПЕП і швидке сканування зварного з'єднання (Рис.2.) [9].



Рис. 2. Сканування ПВЩ труби при ДЧМ УЗК.

Були проведені порівняльні дослідження зміни швидкості ультразвуку у матеріалі труби, для чого поверхня по колу була розділена на 21 сектор, в кожному з яких була виміряна товщина стінки. Далі фіксувався час приходу підповерхневого і донного сигналів відносно зондуєчого імпульсу, а також різниця між ними (Рис.3).

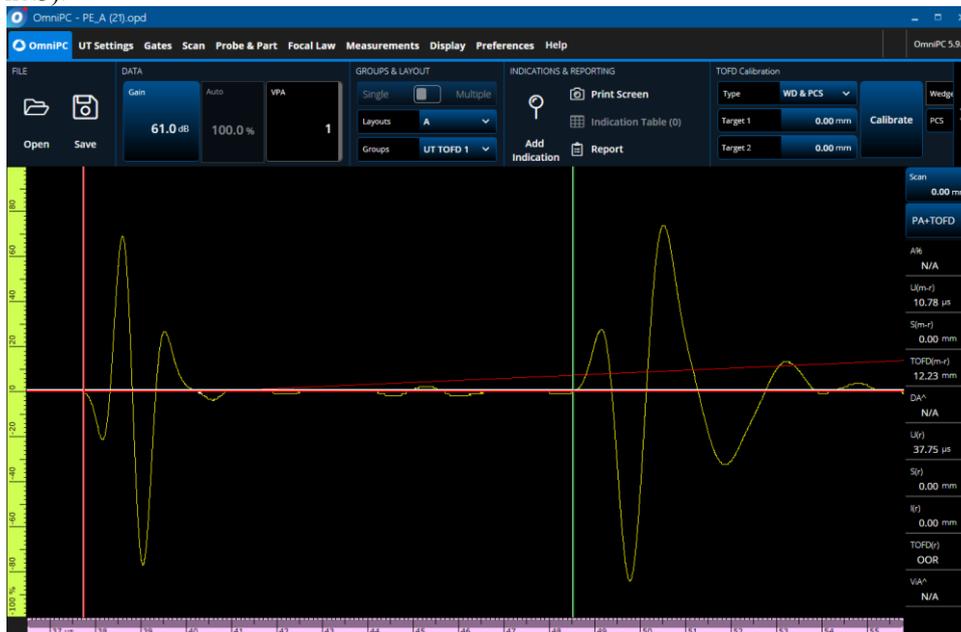


Рис. 3. А-скан розгортка підповерхневого і донного сигналів на бездефектній ділянці.

Час надходження підповерхневих сигналів достатньо стабільний (коливання в межах 1%), а, відповідно, і швидкість ультразвуку, практично незмінні на 21 ділянці по колу труби (Таблиця 3), що підтверджує стабільність характеристик матеріалу і можливість використання ДЧМ для контролю якості зварних з'єднань. В таблиці по кожному з виміряних параметрів розраховане середнє значення, СКВ та довірчі інтервали з імовірністю 0,95.

Таблиця 3.

Час приходу імпульсів (матеріал без шва, зразок S1)

Сектор	№ ділянки	Час приходу підповерхн. хвилі, мкс.	Час приходу донної хвилі, мкс.	Різниця між підповерхн. і донною, мкс.	Товщина стінки труби, сторона А,	№ ділянки	Час приходу підповерхн. хвилі, мкс.	Час приходу донної хвилі, мкс.	Різниця між підповерхн. і донною, мкс.	Товщина стінки труби, сторона В,
1	A1	37,77	48,72	10,95	38,3	B1	38,21	49,65	11,44	38,8
	A2	37,78	48,79	11,01	38,4	B2	38,2	49,68	11,48	39,0
	A3	37,75	48,67	10,92	38,3	B3	38,03	49,63	11,6	39,1
	A4	37,74	48,66	10,92	38,3	B4	37,94	49,5	11,56	39,1
	A5	37,72	48,6	10,88	38,3	B5	37,95	49,55	11,6	39,0
2	A6	37,67	48,55	10,88	38,2	B6	37,92	49,46	11,54	39,1
	A7	37,75	48,52	10,77	38,1	B7	37,93	49,27	11,34	39,2
	A8	37,72	48,53	10,81	38,1	B8	37,92	49,26	11,34	39,0
	A9	37,75	48,49	10,74	38,0	B9	37,92	49,15	11,23	38,9
3	A10	37,75	48,52	10,77	38,3	B10	38,02	49,63	11,61	39,0
	A11	37,69	48,57	10,88	38,6	B11	38,04	49,54	11,50	39,2
	A12	37,77	48,63	10,86	38,6	B12	38,08	49,72	11,64	39,3
	A13	37,75	48,72	10,97	38,5	B13	38,01	49,77	11,76	39,5
	A14	37,83	48,86	11,03	38,5	B14	38,08	49,76	11,68	39,4
4	A15	37,77	48,72	10,95	38,7	B15	38,08	49,83	11,75	39,5
	A16	37,74	48,72	10,98	38,1	B16	38,06	49,78	11,72	39,2
	A17	37,71	48,57	10,86	38,0	B17	38,13	49,68	11,55	38,9
	A18	37,69	48,5	10,81	37,9	B18	38,24	49,7	11,46	38,8
	A19	37,75	48,5	10,75	37,8	B19	38,24	49,72	11,48	38,7
	A20	37,77	48,52	10,75	37,8	B20	38,26	49,73	11,47	38,6
	A21	37,75	48,53	10,78	37,9	B21	38,41	49,87	11,46	38,7
Середнє		37,74	48,61	10,87	38,22		38,08	49,61	11,53	39,05
СКВ		0,04	0,11	0,09	0,27		0,14	0,19	0,14	0,25
Довірч. інтервал (95%)		37,82; 37,67	48,84; 48,39	11,06; 10,68	38,78; 37,66		38,37; 37,79	50,02; 49,21	11,82; 11,25	39,58; 38,52

Виявлення порушень технологічного процесу зварювання у вигляді злипань (так званого холодного зварювання) є складною задачею, що пов'язано, в першу чергу, з дуже щільним приляганням недостатньо нагрітих поверхонь без сплавлення. Зазор між злиплими частинами може складати одиниці і навіть частки мікрометра, що ускладнює їх виявлення. Якщо для налаштування на об'ємні дефекти рекомендується використання бічних і плоскодонних свердлень [3], то для виготовлення зразків з дефектами у вигляді злипань є певні технологічні складнощі, що потребують вирішення перш ніж розпочати експериментальний пошук ефективних режимів контролю.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Дослідження підтвердили ефективність застосування дифракційно-часового методу для контролю стикових з'єднань ПВЩ з використанням поздовжніх хвиль частотою 2,25 МГц. Використання ДЧМ дозволяє значно підвищити швидкість контролю – в 4 рази у порівнянні з луна-імпульсним методом і в 2 рази від контролю з використанням ФАР, а також є бюджетним варіантом контролю на відміну від дефектоскопів з ФАР.

Проведена оцінка швидкості ультразвуку по колу труби показали незначні варіації часу проходження сигналів, що підтверджує рівномірність матеріалу та можливість застосування ДЧМ без необхідності локального переналаштування.

Дифракційно-часовий метод надає ряд переваг: краще співвідношення сигнал шум (>16 dB для поздовжньої хвилі проти 2-4 dB для поперечної) завдяки використанню поздовжніх хвиль і призм з водяним каналом, високу чутливість до дефектів практично незалежно від їх орієнтації, фіксується зниження амплітуди в межах 10 dB.

Луна-імпульсний метод і ФАР мають обмеження через сильне затухання поперечних хвиль, залежність від орієнтації дефекту та складність формування великих кутів уведення в поліетилен відповідно.

Наразі відсутність нормативно-технічної документації з чіткими критеріями якості з'єднань стосовно розмірів дефектів потребує продовження досліджень ультразвуковими та іншими методами неруйнівного контролю для забезпечення якості та довготривалої експлуатації труб з ПВЩ.

Література

1. Глабець С. М. Можливість використання дифракційно-часового методу ультразвукового контролю для стикових зварних з'єднань поліетиленових труб // *Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні*: зб. тез доп. XX Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених. Київ: ПБФ, КІП ім. Ігоря Сікорського, 2024. С. 199–203.
2. MacLennan D., Pettigrew I., Bird C. Plastic Fantastic? – An NDE Inspection Solution for HDPE Butt Welds // *18th World Conference on Nondestructive Testing*, April 2012, Durban, South Africa. *e-Journal of Nondestructive Testing*. 2012. Vol. 17, No. 7. Режим доступу: <https://www.ndt.net/?id=12533>
3. ISO/TS 22499:2024. *Thermoplastic pipes for the conveyance of fluids – Inspection of polyethylene butt fusion joints using phased array ultrasonic testing*. Geneva: International Organization for Standardization, 2024.
4. ISO/TS 16943:2023. *Thermoplastic pipes for the conveyance of fluids – Inspection of polyethylene electrofusion socket joints using phased array ultrasonic testing*. Geneva: International Organization for Standardization, 2023.
5. ДСТУ EN ISO 17640:2022. *Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Методи, рівні контролювання та оцінювання* (EN ISO 17640:2018, IDT; ISO 17640:2018, IDT).
6. Qi G., Li Y., Ding N. Measurement of Acoustic Basic Parameters of Polyethylene Pipe // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 677. 022050. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/677/2/022050>
7. Crawford S. L., Doctor S. R., Cinson A. D., Cumblidge S. E., Anderson M. T. Preliminary Assessment of NDE Methods on Inspection of HDPE Butt Fusion Piping Joints for Lack of Fusion // *Proceedings of the ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference*. Vol. 5. Czech Republic, 26–30 July 2009. P. 219–224. DOI: <https://doi.org/10.1115/PVP2009-77958>
8. Martínez-Oña R., Viggianello S., Bleuze A. On Qualification of TOFD Technique for Austenitic Stainless Steel Welds Inspection // *9th European Conference on NDT*. September 2006, Berlin, Germany.
9. HST-Lite Scanner [Електронний ресурс] / Evident Scientific. 2025. Режим доступу: <https://ims.evidentscientific.com/en/products/industrial-scanners/hst-lite> (Дата звернення: 08.10.2025).

References

1. Hlabets, S. M. (2024). *Mozhlyvist vykorystannia dyfraktsiino-chasovoho metodu ultrazvukovoho kontroliu dlia stykovykh zvarnykh ziednan polietylenovykh trub* (Possibility of using the time-of-flight diffraction ultrasonic testing method for butt-welded joints of polyethylene pipes). In *Efficiency and Automation of Engineering Solutions in Instrument Engineering: Proceedings of the XX All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists* (pp. 199–203). Kyiv: Publishing and Printing Department, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.

2. MacLennan, D., Pettigrew, I., & Bird, C. (2012). Plastic fantastic? – An NDE inspection solution for HDPE butt welds. e-Journal of Nondestructive Testing, 17(7). Proceedings of the 18th World Conference on Nondestructive Testing, April 2012, Durban, South Africa. Retrieved from <https://www.ndt.net/?id=12533>
3. International Organization for Standardization. (2024). ISO/TS 22499:2024. Thermoplastic pipes for the conveyance of fluids – Inspection of polyethylene butt fusion joints using phased array ultrasonic testing. Geneva: ISO.
4. International Organization for Standardization. (2023). ISO/TS 16943:2023. Thermoplastic pipes for the conveyance of fluids – Inspection of polyethylene electrofusion socket joints using phased array ultrasonic testing. Geneva: ISO.
5. Ukrainian Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality. (2022). DSTU EN ISO 17640:2022. Non-destructive testing of welds – Ultrasonic testing – Techniques, testing levels, and assessment (EN ISO 17640:2018, IDT; ISO 17640:2018, IDT). Kyiv.
6. Qi, G., Li, Y., & Ding, N. (2019). Measurement of acoustic basic parameters of polyethylene pipe. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 677, 022050. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/677/2/022050>
7. Crawford, S. L., Doctor, S. R., Cinson, A. D., Cumblidge, S. E., & Anderson, M. T. (2009). Preliminary assessment of NDE methods on inspection of HDPE butt fusion piping joints for lack of fusion. In Proceedings of the ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference (Vol. 5, pp. 219–224). Czech Republic, July 26–30. <https://doi.org/10.1115/PVP2009-77958>
8. Martínez-Oña, R., Viggianello, S., & Bleuze, A. (2006). On qualification of TOFD technique for austenitic stainless steel welds inspection. In Proceedings of the 9th European Conference on Non-Destructive Testing. Berlin, Germany.
9. Evident Scientific. (2025). HST-Lite Scanner [Online resource]. Retrieved October 8, 2025, from <https://ims.evidentscientific.com/en/products/industrial-scanners/hst-lite>