

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ АУСТЕНІТНИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ЕНЕРГОБЛОКУ № 3 ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ АЕС

В.М. Тороп, Є.О. Давидов, М.Д. Рабкіна

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: v.torop@gmail.com

Для підтримки необхідного рівня безпеки та надійності трубопроводів діаметром 325 мм (Ду 300) та товщиною стінки 16 мм на Чорнобильській АЕС було розроблено спеціальну програму діагностичних і ремонтно-відновлювальних робіт. Відповідно до цієї програми в період 1997–2005 рр. виконано значний обсяг радіографічного (RT), ультразвукового (UT), капілярного (PT) та візуально-вимірювального (VT) контролю зварних з'єднань трубопроводів Ду 300, виготовлених із аустенітної сталі 08X18H10T. Незважаючи на те, що з того часу минуло більше 20 років, методи неруйнівного контролю ґрунтуються на тих самих фізичних принципах і використовуються практично ті ж самі методологічні підходи до неруйнівного контролю (NDT). Тому аналіз результатів великого обсягу експлуатаційного контролю є дуже корисним для розуміння достовірності методів неруйнівного контролю, що використовуються у сучасній повсякденній практиці. Слід зазначити, що роботи з аналізу результатів контролю виконувалися у рамках самостійного завдання, а не спеціально для оцінки та порівняння методів NDT, тому викладений у статті аналіз є об'єктивним, ретроспективним і незаангажованим, тобто відображає можливий результат, а не бажаний. Бібліогр. 28, табл. 5, рис. 17.

Ключові слова: достовірність неруйнівного контролю (NDT), аустенітні зварні з'єднання, радіографічний (RT), ультразвуковий (UT), капілярний (PT), візуально-вимірювальний (VT) контроль, реальні розміри тріщини

Вступ. 26 квітня 2026 р. виповнилося 40 років від катастрофічного вибуху, що стався на 4-му енергоблоці Чорнобильської АЕС (ЧАЕС). Відтоді й до теперішнього часу продовжується виконання колосального об'єму різнопланових робіт щодо ліквідації наслідків аварії [1]. Трубопроводи контуру багаторазової примусової циркуляції (КМПЦ) Ду 300 енергоблоку № 3 ЧАЕС (опускні – ОТ, напірні – НТ та трубопроводи системи аварійної зупинки реактора – САОР) виготовлені зі сталі 08X18H10T відповідно до вимог ТУ 14-3-197-73. Розмір труб 325×16 мм. Трубопроводи на енергоблоці № 3 ЧАЕС введено в експлуатацію у квітні 1981 р. На момент проведення експлуатаційного контролю в період середнього планового ремонту 1997 р. (СПР-97) реакторна установка енергоблоку № 3 відпрацювала 99000 год, при цьому кількість повних циклів (розігрів–розхолодження) становила 52, кількість виконаних гідровипробувань – 17 (тиск гідровипробувань 103 кгс/см²).

У процесі експлуатації енергоблоку №3 ЧАЕС з 1981 р. контроль за станом зварних з'єднань (ЗЗ) трубопроводів виконувався відповідно до вимог інструкції АІЕ-10-89, в якій передбачено регламентний обсяг контролю: три зварні з'єднання опускного трубопроводу (ОТ) від кожного барабан-сепаратора після 45000 год експлуатації. Передбачений радіографічний контроль (РТ) зварних

з'єднань проводився гаммаридом типу 192/120 з розміром фокусної плями 3,5×3,5 мм із використанням плівки РТ-1. З початку експлуатації й до 1997 р. дефектів типу тріщин не виявлено.

Проблематика. З проблемою міжкристалітного корозійного розтріскування під напругою (МКРПН або IGSCC) зварних з'єднань трубопроводів, виготовлених із аустенітних нержавіючих сталей, вперше зіткнулися на атомних електростанціях (АЕС) із реакторами BWR західні країни та Японія на початок 70-х років ХХ ст. [2]. Перші публікації щодо проблеми МКРПН у зварних з'єднаннях трубопроводів контуру реактора BWR були здійснені «Групою дослідження проблем тріщин у трубопроводах» під егідою національної регуляторної комісії (NRC) США в 1975–1977 рр. [3]. Кількість пошкоджень, що спостерігалися на трубопроводах реакторної установки типу BWR у початковий період прояву механізму МКРПН ілюструє рис. 1 [2].

21 липня 1997 р. енергоблок № 3 Чорнобильської АЕС було зупинено для проведення середнього планового ремонту. До початку середнього планового ремонту енергоблоку № 3 у 1997 р. (СПР-97) було відомо, що в аналогічних трубопроводах Ду 300 КМПЦ виявлено протяжні дефекти типу тріщин і дефекти зварювання, що не виявлялись під час монтажу та регламентного експлуатаційного контролю трубопроводів (табл. 1). Тому керівництвом ЧАЕС було ухвалено рішення про проведення додаткового обсягу неруйнівного

Авторське право © Автор(и)

© Видавець ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ» ПАТОН», 2026

Ця стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

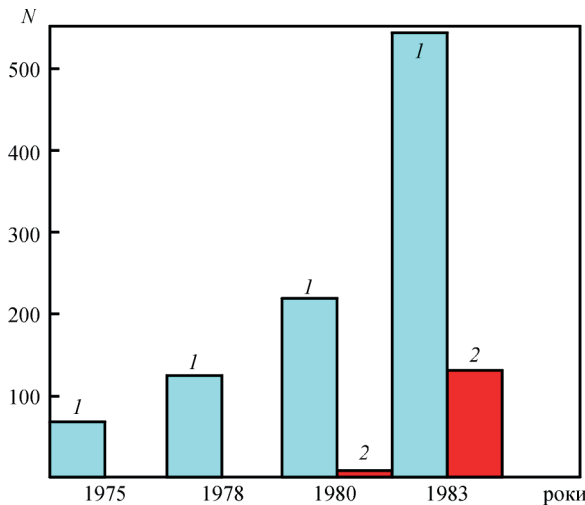


Рис. 1. Кількість виявлених пошкоджень на трубопроводах реакторів BWR у початковий період спостереження за дією механізму МКРПН (IGSCC) [2]: 1 – для всіх трубопроводів, 2 – для всіх трубопроводів діаметром більше 20” (510 мм), N – кількість випадків МКРПН у всьому світі

контролю. За результатами цього контролю виявилося, що кількість ЗЗ з неприпустимими дефектами становила близько 20 % від загальної кількості проконтрольованих ЗЗ. Враховуючи цей факт і керуючись вимогами Норм і Правил, прийнятих в ядерній енергетиці України, головним інженером ЧАЕС було прийнято рішення про проведення 100 % радіографічного контролю (RT) всіх зварних з’єднань трубопроводів Ду 300 КМПЦ (ОТ, НТ і САОР).

Практика використання радіографічного контролю трубопроводів Ду 300 КМПЦ під час СПР-97. 23 жовтня 1997 р. на енергоблоці № 3 ЧАЕС було закінчено 100 % радіографічний контроль ЗЗ трубопроводів Ду 300 КМПЦ, який виконували відповідно до вимог ГОСТ 7512-82 [4] та ПНАЕ Г-7-017-89 [5], а оцінка якості проводилась за ПК 1514-72 [6] для 1451 зварних з’єднань, що становить практично 100 % від усього об’єму ЗЗ трубопроводів Ду 300. Експлуатаційний RT проводився з використанням приладу виробни-

цтва США «Амертест» із джерелом J_r-192. Розмір фокусної плями 1,5×1,5 мм. Використовувалася плівка типу Д-4 (виробництво Бельгії). Досягнута чутливість по дротяному зразку № 3 при просвічуванні через дві стінки становила 0,32, а в канавочному зразку № 1 – 0,2. Загалом метод RT має ряд особливостей, що ускладнюють достовірний контроль:

- необхідність випорожнення трубопроводів;
- просвічування через дві стінки;
- необхідність просвічування з кількох напрямків для виявлення тріщин різної орієнтації;
- наявність природного радіаційного фону.

Безпосередньо в ГОСТ 7512-82 [4] зазначається, що при радіографічному контролі не виявляють непровари і тріщини, площа розкриття яких не збігається з напрямом просвічування і/або величина розкриття яких менша за 0,1 мм. Очевидно, що ці особливості методу RT можуть бути причиною помилок у пошуку дефектів.

У табл. 2 та на рис. 2 наведено результати експлуатаційного радіографічного контролю зварних з’єднань трубопроводів Ду 300 енергоблоку № 3 ЧАЕС. Таким чином, у період СПР-97 у результаті 100 % RT було виявлено 268 дефекти. Як впливає з наведених даних у табл. 1 і 2, дефектність трубопроводів, що розглядаються, є різною для різних АЕС, причому максимальний рівень дефектності перевищує 37 % для НТ ЛАЕС-3, у той час як для НТ ЧАЕС-3 він становить 18 %. Зазначимо, що близько 90 % дефектних ЗЗ ОТ ЛАЕС належали до заводських швів, тоді як на ЧАЕС більшість дефектів (99,5 %) виявлено у монтажних стиках. Спільним для ЧАЕС та ЛАЕС є підвищена дефектність ЗЗ в області компенсаційних петель, розташованих у приміщеннях барабан-сепараторів (54 % від усіх дефектів, виявлених на ОТ ЧАЕС-3). Якщо не брати до уваги можливу відмінність у виявленні дефектів і режимах експлуатації на різних АЕС, то найбільш вірогід-

Таблиця 1. Результати неруйнівного контролю зварних з’єднань трубопроводів Ду 300 на аналогічних енергоблоках реакторів РБМК у 1997 р.

Трубопроводи АЕС	Кількість проконтрольованих ЗЗ за:		Кількість виявлених тріщин N		Дефектність, %	
	RT	UT (методика контролю)	NRT	NUT	NRT/RT, %	NUT/UT, %
ОТ САЕС-1	46	217 (МЦУ-7-97)	2	11	4,3	5,1
ОТ КАЕС-1	445	445 (МТ-34-70-023-86)	5	34	1,1	7,6
ОТ КАЕС-2	64	44 (МТ-34-023-86)	1	1	1,6	2,3
ОТ ЛАЕС-3	495	123 (ТИ-ЛМ-2-96)	175	101	35,3	82,1
НТ ЛАЕС-3	484	–	163	–	33,7	–
САОР ЛАЕС-3	82	–	32	–	39,0	–
ОТ ІАЕС	264	–	60	–	22,7	–

Примітка: ОТ САЕС-1 – опускні трубопроводи енергоблоку № 1 Смоленської АЕС ;ОТ КАЕС-1 і ОТ КАЕС-2 – опускні трубопроводи енергоблоку № 1 і 2 Кольської АЕС відповідно; НТ ЛАЕС-3 і САОР ЛАЕС-3 – напорні трубопроводи і трубопроводи САОР енергоблоку № 3 Ленінградської АЕС відповідно; ОТ ІАЕС – опускні трубопроводи Ігналінської АЕС.

Таблиця 2. Результати експлуатаційного радіографічного контролю, виконаного у період СПР-97 на трубопроводах Ду 300 енергоблоку № 3 ЧАЕС

Трубопроводи	Число проконтрольованих зварних з'єднань	Число швів з дефектами	Тип дефекта	
			Тріщина	Дефект зварювання
Опускні (ОТ)	768	134 (17 %)	98 (13 %)	36 (5 %)
Напорні (НТ)	496	89 (18 %)	79 (16 %)	10 (2 %)
Трубопроводи САОР	187	45 (24 %)	31 (17 %)	14 (7 %)
Всього	1451	268 (18 %)	208 (14 %)	60 (4 %)

ною причиною суттєвої відмінності в дефектності може бути відмінність в якості виготовлення 33. З табл. 2 випливає, що на ЧАЕС-3 виявлених дефектів типу тріщин приблизно в 3,5 рази більше, ніж дефектів зварювання (усадка кореня шва, непровари, шлакові включення тощо).

У своєму листі № 07/2-11/1295 від 10.10.1997 р. адміністрація ядерного регулювання Україна (АЯРУ), посилаючись на те, що «... відповідно до вимог п. 11.7.1 ПНАЕ Г-010-89 [7] експлуатація трубопроводів зі зварними з'єднаннями, що мають тріщини, неприпустима; відповідно до вимог п. 9.1.6 ПНАЕ Г-7-008-89 [8] при виявленні тріщин і свищів в основному металі та зварних з'єднаннях обладнання та трубопроводів, вони повинні бути негайно відключені» рекомендувала ЧАЕС «...вжити негайних технічних та організаційних заходів щодо усунення виявлених дефектів до виходу блока № 3 із ППР-97».

Тому всі 268 дефектні 33 були відремонтовані в період ремонтної кампанії 1997–1998 рр., з них 208 тріщиновмісних 33 і 20 33 із дефектами зварювання, шляхом вирізки дефектного зварного з'єднання з наступною вставкою відрізка труби у відповідності до вимог п. 9.11 ПНАЕГ-7-009-89 [9], а 40 33 із дефектами зварювання відремонтовано за розробленою в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України технологією ТИЦ 104.0260-97 (виправлення локальної дефектної ділянки шляхом місцевої вибірки та подальшого її заварювання згідно з пп. 9.6 та 9.13 ПНАЕГ-7-009-89 [9]). Зазначимо, що у разі

усунення дефектного 33 шляхом врізання котушки була досягнута продуктивність праці 1 дефект за 2 доби при роботі 65 слюсарів та 16 зварників, а при ремонті за технологією ТИЦ 104.02.0260-97 – 1 дефект за 0,5 доби. При цьому технологія ремонту врізанням котушок передбачає появу двох нових 33, виконаних ручним дуговим зварюванням в умовах СПР, замість видаленого одного, виготовленого в заводських або монтажних умовах.

Загальна чисельність ремонтного персоналу в 1997 р. перевищила 2000 людей. Колективна доза персоналу (ремонтного та оперативного) перевищила 1300 бер, із них ремонтного персоналу – 1238 бер, а додаткові фінансові витрати оцінювалися у 10 млн грн (5,5 млн доларів США). Аналогічно за оцінкою Смоленської АЕС витрати на підготовку, контроль та ремонт зварних з'єднань у кількості 1244 одиниць на першому енергоблоці склали під час планово-профілактичного ремонту (ППР), що проводився з 28.08.1997 р. по 05.02.1998 р., понад 3,8 млн доларів США. При цьому втрати від недовироблення електроенергії та тепла не враховувалися.

Результати ультразвукового контролю трубопроводів Ду 300 енергоблоку № 3 ЧАЕС. Під час проведення СПР-97 паралельно з РТ, проводився УТ за методикою МТ-34-70-023-86 [10] на 126 33. У протоколах наради фахівців ЧАЕС зазначається, що у перевірених 126 33 виявленість дефектів методом УТ становила лише 48 % у порівнянні з РТ. На початку робіт із виконання неруйнівного контролю 33 трубопроводів Ду 300 УТ розглядався як додатковий (факультативний), що пояснюється цілком зрозумілими фізичними особливостями УТ. Наприклад, стандарт ISO 17635-2018 [11] для контролю аустенітних матеріалів рекомендує серед методів РТ та УТ вибирати рентген. На французьких АЕС експлуатаційний контроль аустенітних зварних швів також проводиться переважно на основі радіографічних методів [12]. Фахівці ЧАЕС використовували метод РТ як основний, а ультразвук як допоміжний.

У СПР-97 ультразвуковий контроль проводився дефектоскопом УД-2-12 із використанням стандартних перетворювачів типу П121-5,0-70-002 та П121-5,0-50-002 із кутами введення променя 70°

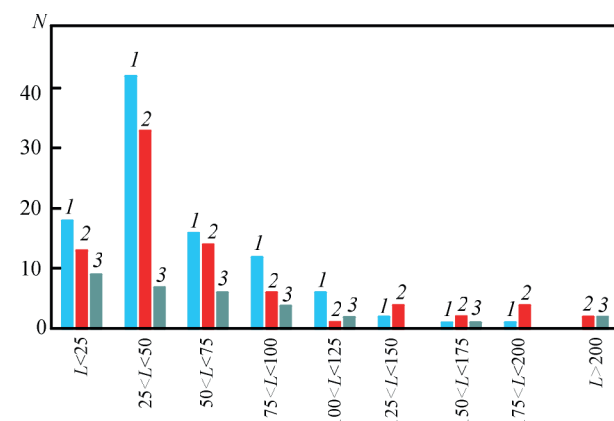


Рис. 2. Гістограма протяжності тріщин за результатами експлуатаційного РТ у період СПР-97: 1 – ОТ, 2 – НТ, 3 – САОР, N – кількість виявлених РТ тріщин завдовжки L, мм

та 50° відповідно. Налаштування дефектоскопа виконувалася на зразках, виготовлених відповідно до рекомендацій методик МТ34-70-023-86 [10] та ТИ-ЛМ-2-96. Пошук та орієнтація відбивачів, закладених у контрольних зразках, проводився на рівні пошукової чутливості, обраної на 6 дБ вище за контрольну. Для зручності фіксування результатів рівень контрольної чутливості встановлювався на рівні 28 дБ. З метою вирішення проблеми контролю аустенітних ЗЗ на той час різними організаціями були розроблені та впроваджені на АЕС методики ручного ультразвукового контролю:

МТ-34-70-023-86 [10] (ВТИ, ЕМП) – поперечні хвилі, спеціальний похилий п’єзоелектричний перетворювач (ПЕП);

Методика ВНИИАЭС – поздовжні хвилі, спеціальні роздільно-сумісні ПЕП 45°, 60° і 70°;

ТИ ЛМ 2 – 95 (ЛАЕС – ЦНИИКМ «ПРОМЕТЕЙ») – поперечні хвилі МВВ70N2;

Методика МГТУ ім. Баумана – поперечні хвилі, спеціальний роздільно-сумісний ПЕП;

МЦУ-7-97 [13] (НПО «ЦНИИТМАШ») – головні хвилі, спеціальний роздільно-сумісний ПЕП;

МЦУ-5-99 (НПО «ЦНИИТМАШ»). Методика ультразвукового контролю ЗЗ трубопроводів із аустенітної сталі енергоблоків типу РБМК-1000: поперечні хвилі, спеціальний хордовий ПЕП.

Деяке уявлення щодо результативності застосування різних методик УТ із визначення тріщиноподібних дефектів в аустенітних ЗЗ ілюструє рис. 3.

Як впливає з рис. 3, МЦУ-7-97, розроблена ЦНИИТМАШ у 1997 р. і яка пройшла успішну апробацію на енергоблоках рф і Латвії, мала кращі кількісні показники у порівнянні навіть із автоматизованими системами, що використовували складні алгоритми та методи обробки (наприклад, Авгур). Тому АЯРУ рекомендувала (№07/2-11/1343 від 16.10.1997 р. та №07-11/1511 від 21.11.1997 р.) Чорнобильській АЕС провести експертний УЗК (УТ) ЗЗ ОТ та НТ Ду300 КМПЦ за методикою МЦУ-7-97. У період із 04 по 08 грудня 1997 р. за методикою МЦУ-7-97 було про-

контрольовано 135 ЗЗ ОТ і виявлено протяжні відбивачі в 19 ЗЗ, що склало 14 % дефектності, які раніше були проконтрольовані РТ і були визнані бездефектними (хибнонегативний результат або недобраковка за РТ). Крім того, було проконтрольовано 45 ЗЗ НТ, у яких раніше РТ було виявлено неприпустимі дефекти. За результатами експертного УТ у 6-ти ЗЗ відбивачів не виявлено, що становить недобраковку до 13 %. Аналіз результатів РТ ЗЗ НТ показав, що в шести ЗЗ радіографічний контроль виявив ділянки з несучільностями завдовжки 30 мм і менше.

Виходячи з високих рівнів ризику, адміністрацією ЧАЕС було ухвалено рішення про виконання 100 % ультразвукового контролю ЗЗ, які пройшли РТ із позитивними результатами. У період з 04.12.1997 р. по 12.02.1998 р. проведено 100 % УТ контроледоступних ЗЗ ОТ, НТ та трубопроводів САОР за методикою МЦУ-7-97, при якому виявлено 183 ЗЗ із різною довжиною несучільностей (табл. 3). З них, на підставі розрахункових обґрунтувань:

70 ЗЗ призначено до ремонту та відремонтовано;

113 допущено до експлуатації на один календарний рік.

Зазначимо, що методика МЦУ-7-97 була спеціально розроблена для виявлення тріщин, що розвиваються від внутрішньої поверхні зварного з’єднання (від кореня). Контроль за цією методикою заснований на використанні поздовжніх хвиль із кутом, близьким до першого критичного. Застосовується спеціальний перетворювач типу тандем. На ЧАЕС методика пройшла спеціальну процедуру атестації в НАЕК «Енергоатом» та була затверджена АЯРУ. У доступних нам документах відсутні докладні відомості про те, як саме проводилася атестація. Однак можна з упевненістю сказати, що така робота проводилася, оскільки у листі заступника керівника АЯРУ від 20.03.1998 р. щодо атестації методики МЦУ-7-97 було зроблено такі зауваження:

– розташування та протяжність дефектів у зварних з’єднаннях трубопроводів 2РГ-2 ст. 4 та 2РГ-22 ст. 6, зафіксовані в результаті атестаційних випробувань двома незалежними бригадами дефектоскопістів, не ідентифікуються;

– не виконаний руйнівний контроль цих зварних з’єднань, передбачений «Програмою атестації...» на підтвердження атестації;

– результати УЗК, отримані під час використання методики МЦУ-7-97, не можуть бути підставою для визначення міцності та залишкового ресурсу трубопроводів розрахунковим шляхом, як це запи-

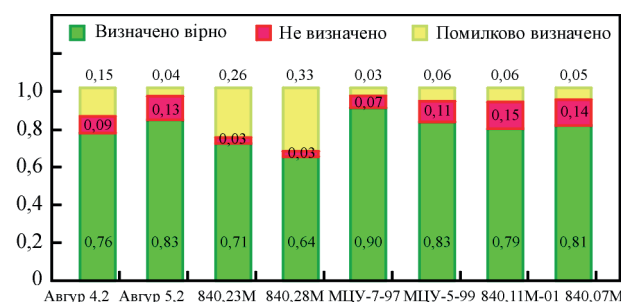


Рис. 3. Порівняння результативності застосування різних методик УТ [14]

Таблиця 3. Результати експлуатаційного ультразвукового контролю, виконаного за методикою МЦУ-7-97 у період СПР-97 на 33 трубопроводів Ду 300 енергоблоку № 3 ЧАЕС, що пройшли РТ із позитивними результатами

Трубопроводи	Число проконтрольованих ЗЗ	Число ЗЗ з відбивачами (дефектність у %)
Опускні (ОТ)	640	82+6 ⁹ (14 %)
Напорні (НТ)	362	93 (26 %)
Трубопроводи САОР	143	8 (5,5 %)
Всього	1145	183+6 ⁹ (16,5 %)

Примітка: *) додані ЗЗ, що були вирізані в 1997 р. з метою відпрацювання методики МЦУ-7-97.

сано у п. 3 «Протоколу засідання атестаційної комісії...», оскільки методика МЦУ-7-97 не дозволяє визначати глибину тріщини.

Для усунення зауважень АЯРУ негайно було вирізано та обстежено в лабораторії металів ЧАЕС зварні з'єднання трубопроводів 2РГ-2 ст. 4 та 2РГ-22 ст. 6, про що свідчать Протоколи №№ 8414, 8415 від 27.03.1998 р. Котушки завдовжки 150 мм зі зварним швом посередині були розрізані за розміткою на 17 темплетів за допомогою дискової фрези завширшки 3 мм. Ширина темплетів становила 45...52 мм, рахуючи по внутрішній поверхні труби, а товщина відповідала товщині стінки труби 16 мм. Вирізані темплети з можливими (передбачуваними) дефектами піддавалися долому за схемою триточкового вигину. Максимальне зусилля змінювалося в межах 3...20 тс залежно від ширини темплету та розмірів дефекту.

На рис. 4, а наведено схему розташування тріщин, що були виявлені контролерами при атестації УТ методики МЦУ-7-97, а також розташування по довжині ЗЗ (ст. 4 2РГК-2), їхню нумерацію та фактичну (реальну) довжину тріщин у доломах відповідних темплетів за результатами VT (нумерація темплетів у обведених цифрах від 1 до 17), де співвідношення номера тріщини та її довжини наступне: № 1 – 45 мм, № 2 – 26 мм, № 3 – 86 мм,

№ 4 – 192 мм, № 5 – 131 мм, № 6 – 33 мм, № 7 – 182 мм, УТ – 300 і 20 мм.

Після долому темплетів №№ 2–5 виявлені дві паралельні кільцеві тріщини, що перериваються, та є симетричними щодо осі ЗЗ (рис. 4, б). Довжина тріщини на темплеті № 2 складала 45 мм за максимальної глибини 12 мм, на темплеті № 3 – 26 мм за максимальної глибини 7,5 мм, на темплеті № 3–5 – 86 мм за максимальної глибини 11 мм.

Після долому темплетів №№ 5–9 виявлено тріщину завдовжки 192 мм і з максимальною глибиною 10 мм, на темплеті № 10–12 – тріщину завдовжки 131 мм і з максимальною глибиною 10 мм, на темплеті № 14 – тріщину завдовжки 33 мм і з максимальною глибиною 11 мм і на темплеті №№ 15–17 – тріщину завдовжки 182 мм і з максимальною глибиною 11 мм. Уявлення про форму тріщин, виявлених у ст. 4 напірного трубопроводу 2РГК-2, ілюструє рис. 5, де співвідношення номера тріщини та її довжини наступне: № 1 – 45 мм, № 2 – 26 мм, № 3 – 86 мм, № 4 – 192 мм, № 5 – 131 мм, № 6 – 33 мм, № 7 – 182 мм.

Аналогічні дослідження проведено для 2РГК-22 ст. 6. На рис. 6 наведено схему розташування тріщин, що були виявлені контролерами УТ при атестації методики МЦУ-7-97, а саме, зафіксовано несучільності завдовжки $L = 40$ мм, $\Omega: (3^{45}, 4^{10})$; $L = 180$ мм, $\Omega: (6^{20}, 8^{00})$ і $L = 90$ мм, $\Omega: (9^{00}, 10^{00})$, а також їхнє роз-

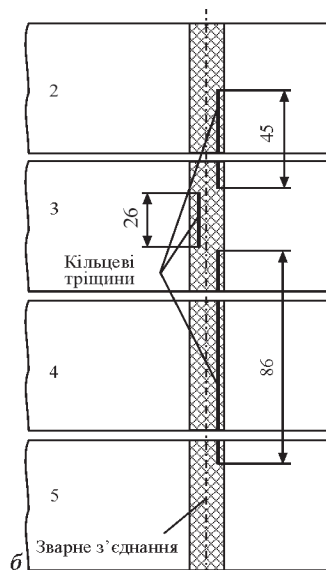
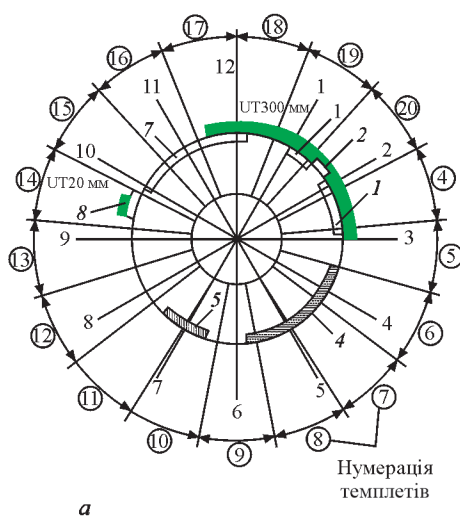


Рис. 4. Схема розташування тріщин при атестації УТ методики МЦУ-7-97 (а) і схема розташування виявлених тріщин у темплеті №№ 2–5 (б)

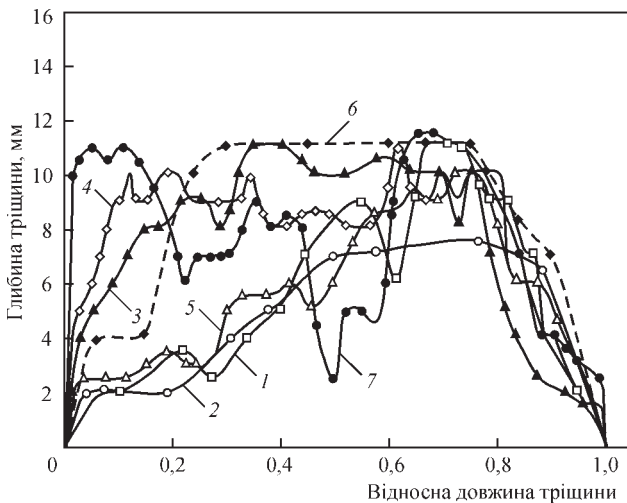


Рис. 5. Форма тріщин, виявлених у ст. 4 напірного трубопроводу 2РГК-2

ташування по довжині 33 (ст. 6 2РГК-22), їхню нумерацію (від 1 до 8) та фактичну (реальну) довжину тріщин, що були заміряні при VT у доломах відповідних темплетів (нумерація в обведених цифрах від 20 до 36). Тут співвідношення номера тріщини та її довжини наступне: № 1 – 305 мм, № 2 – 73 мм, № 3 – 55 мм, № 4 – 36 мм, № 5 – 75 мм, № 6 – 18 мм, № 7 – 76 мм, № 8 – 36 мм, УТ – 40, 180, 90 мм

Після долому темплетів №№ 20–26 виявлено дві паралельні кільцеві тріщини, що перериваються, і є симетричними щодо осі 33 (рис. 7, а). Довжина тріщини на темплетях №№ 20–22 склала 73 мм за максимальної глибини 10 мм, на темплетях №№ 20–26 – 305 мм за максимальної глибини також 10 мм, на темплетях №№ 25 і 26 – 55 мм за максимальної глибини 7 мм.

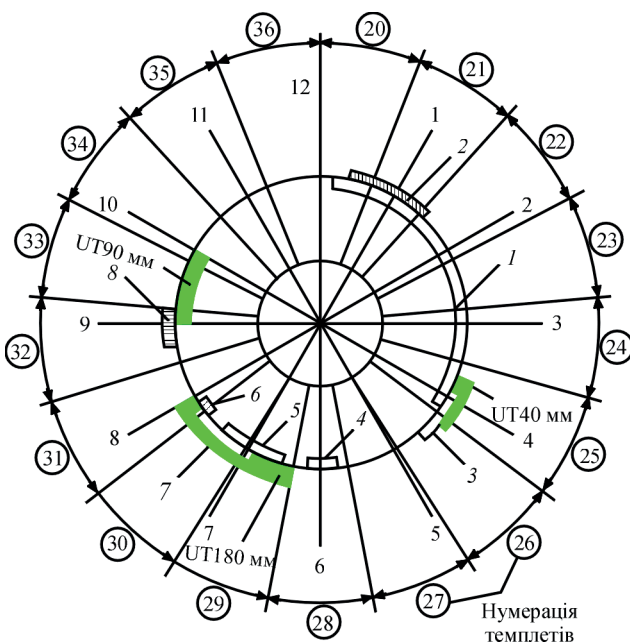


Рис. 6. Схема розташування тріщин, що були виявлені контролерами УТ при атестації методики МЦУ-7-97

Після долому темплетів №№ 29–31 також виявлено дві паралельні кільцеві тріщини, що перериваються, і є симетричними щодо осі 33 (рис. 7, б). Довжина тріщини на темплетях №№ 29, 30 склала 75 мм за максимальної глибини 6,5 мм, на темплетях №№ 29–31 – 76 мм за максимальної глибини 7,5 мм і темплетях №№ 30 і 31 – 18 мм за максимальної глибини 9 мм. Після долому темплетів №№ 28 і № 32 у кожному з них виявлено тріщину завдовжки 36 мм, максимальної глибини 8 і 7,5 мм відповідно.

Уявлення про форму тріщин, виявлених у ст. 6 напірного трубопроводу 2РГК-22, ілюструє рис. 8, де співвідношення номера тріщини та її довжини наступне: № 1 – 305 мм, № 2 – 73 мм, № 3 – 55 мм, № 4 – 36 мм, № 5 – 75 мм, № 6 – 76 мм, № 7 – 18 мм, № 8 – 35 мм.

Якщо порівнювати розташування та довжину несутцільностей, виявлених контролерами УТ при атестації методики МЦУ-7-97, з фактичним розташуванням і розмірами тріщин, визначеними ві-

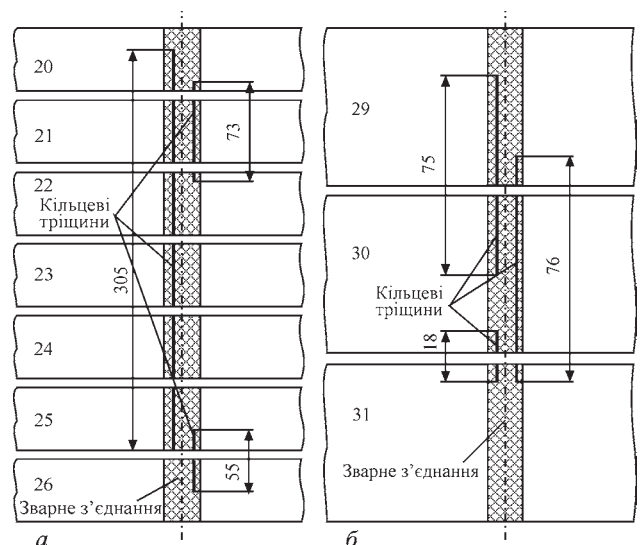


Рис. 7. Схема розташування тріщин у темплетях: а – №№ 20–26, б – №№ 29–31

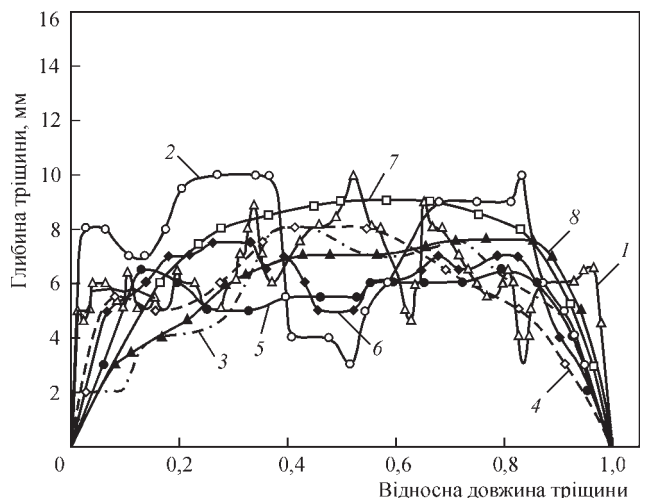


Рис. 8. Форма тріщин, виявлених у 33 (ст. 6 напірного трубопроводу 2РГК-22)

зуально-вимірювальним контролем (VT) (рис. 4, а), то для 2РГ-2 ст. 4 несучільність протяжністю $UT = 300$ мм підтверджується фактичними (реальними) тріщинами $VT = 45$ (1) + 26 (2) + 86 (3) + 182 (7) = 339 мм, а $UT = 20$ мм – фактичною тріщиною $VT = 33$ мм. Недобраковка (хибно-негативний результат – дефект є, але метод його не виявив) за довжиною несучільностей становить $11,5$ і 39 % відповідно при вельми коректному визначенні місця розташування дефектів. При цьому реальні тріщини завдовжки 192 (4) і 131 (5) мм залишилися непоміченими контролерами UT, хоча максимальна глибина цих тріщин досягала 10 мм або $62,5$ % від товщини стінки труби.

Аналогічне порівняння можна виконати й для 2РГК-22 ст. 6 (рис. 6). Несучільність протяжністю $UT = 40$ мм підтверджується фактичною тріщиною $VT = 55$ мм (3), $UT = 180$ мм – фактичними тріщинами $VT = 75$ (5) + 18 (6) + 76 (7) = 169 мм, а $UT = 90$ мм – фактичною тріщиною $VT = 36$ мм (8). Недобраковка (хибно-негативний результат) за довжиною несучільності становить 27 % для тріщини завдовжки 55 мм (3), а перебраковка (хибно-позитивний результат – дефект відсутній, а метод вказує на його наявність) для тріщин завдовжки 169 і 36 мм (8) становить 6 і 60 % відповідно при досить коректному визначенні місця розташування дефектів. При цьому реальні тріщини завдовжки 305 (1), 73 (2) і 36 (4) мм залишилися непоміченими контролерами UT, хоча їхня максимальна глибина досягала 10 , 10 і $7,5$ мм, що становила до $62,5$ % від товщини стінки труби.

Після затвердження МЦУ-7-97 усі роботи з контролю зварних з'єднань трубопроводів енергоблоку № 3 ЧАЕС проводилися за цією методикою, хоча до неї вносилися певні вдосконалення. Так, наприклад, відповідно до п.п. 1.3.1 і 4.2.1 методики МЦУ-7-97 оцінка якості проводиться за першим із серії ехо-сигналів, відбитих від несучільності (за ехо-сигналом головної хвилі). Однак у світовій практиці UT для оцінки допустимості дефектів, як правило, використовується другий ехо-сигнал (так званий Self-tandem) як найінформативніший.

У цьому випадку другий сигнал зазвичай має більшу амплітуду. При контролі в СПР-97 проходило освоєння методики МЦУ-7-97, і оператори-дефектоскопісти, очевидно, проводили оцінку зварних з'єднань строго за методикою. А вже при повторному контролі в СПР-99 оцінка якості зварних з'єднань, в окремих випадках (при малих амплітудах першого ехо-сигналу), проводилася за другим сигналом, що підтверджується результатами експертного контролю. Так, у зварних з'єднан-

нях 1РГК-3 ст. 10, 1РГК-17 ст. 10, 1РГК-16 ст. 12, 1РГК-18 ст. 12, 1РГК-14 ст. 11 та ін. амплітуда другого сигналу на $6...8$ дБ була більшою від амплітуди першого ехо-сигналу, за яким у відповідності до методики МЦУ-7-97 повинна була проводитись оцінка якості зварних з'єднань. При цьому довжина несучільностей, виміряна за першим сигналом, значно менша від протяжності, виміряної за другим сигналом. Так, протяжність (довжина) дефекту в зварному шві 1РГК-14 ст. 11, виміряна за другим сигналом, становить 40 мм, а за першим – тільки 20 мм, протяжність несучільностей у зварних з'єднаннях 1РГК-3 ст. 10, 1РГК-17 ст. 10, 1РГК-16 ст. 12, 1РГК-18 ст. 12, 1РГК-14 ст. 11 – не більше 10 мм, тобто несучільності є точковими. З іншого боку, слід зазначити, що амплітуди перших ехо-сигналів від відбивачів, не зафіксованих до СПР-99, становлять $4...6$ дБ щодо рівня бракування, тобто близькі до пошукового рівня (у даній інструкції пошуковий рівень відрізняється від бракувального на 6 дБ).

Крім того, слід враховувати, що значний вплив на відтворюваність (повторюваність результатів) контролю мають умови проведення контролю:

- якість підготовки поверхні зварного з'єднання;
- точність виготовлення СЗП (стандартного зразка підприємства);
- температура при налаштуванні та проведенні контролю.

Відповідно до нормативно-технічної документації [7, 10, 13] при проведенні ультразвукового контролю допускається похибка вимірювання амплітуди ± 2 дБ. Тому в зварних швах, у яких виявлені відбивачі з перевищенням над пошуковим рівнем до 2 дБ, що знайдені при контролі в 1999 р., могли не фіксуватися під час проведення контролю в 1997–1998 р.р. як з об'єктивних, так і з суб'єктивних причин. Відбивачі ж з амплітудою ехо-сигналу, що перевищує на 2 дБ пошуковий рівень, мали б бути зафіксовані при попередньому контролі.

Різниця амплітуд сигналів від паза завглибшки 2 мм на різних СЗП становила 2 дБ. Відмінність зумовлена тим, що паз виконується в зварному з'єднанні і, природно, амплітуда сигналу залежить від режимів зварювання та розташування паза у зварному шві. Амплітуда ехо-сигналу головної хвилі, відбитої від паза, має нелінійну залежність від його глибини. За глибини паза близько 6 мм ця характеристика має локальний мінімум. При цьому амплітуда сигналу знижується до амплітуди сигналу від паза завглибшки 2 мм, тобто до пошукового рівня та при подаль-

шому збільшенні глибини паза амплітуда знову збільшується.

Слід зазначити, що з кінця 1970-х по 1990-і р.р. було реалізовано міжнародну програму дослі-

джень PISC (Program for the Inspection of Steel Components). Це була серія великомасштабних міжнародних проєктів (PISC I, PISC II, PISC III) щодо оцінки ефективності ультразвукового контр-

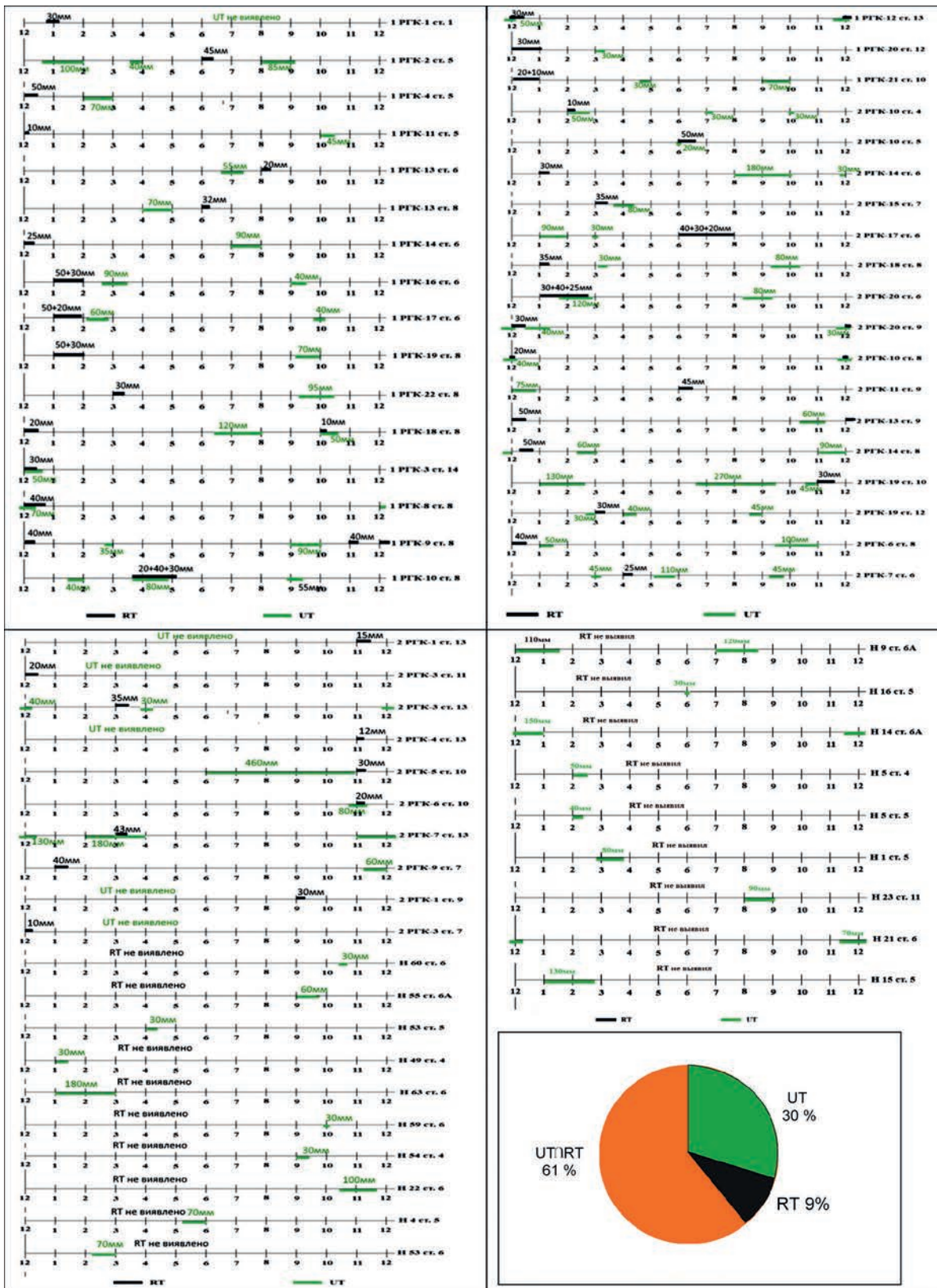
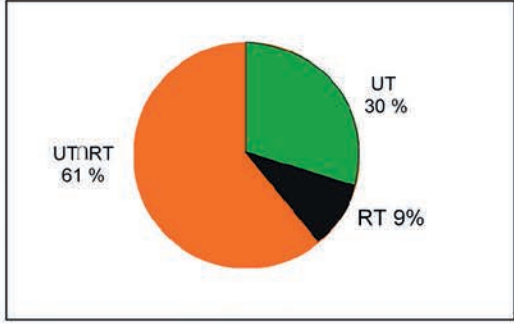


Рис. 9. Розміри та розташування несутцільностей, виявлених RT і UT на опускних трубопроводах (позначені нитки (H) і стики (ст.) 33), а також напірних трубопроводах (позначені 1РГК для першого розподільного групового колектора (РГК) і 2РГК – для другого, із зазначенням номера 33 (ст.)



олу (UT) відповідальних конструкцій, особливо в атомній енергетиці [15]. Дослідження PISC допомогли розробити міжнародні стандарти та методики моделювання ультразвукових сигналів, що призвело до значного підвищення якості промислової дефектоскопії, надійності, достовірності й точності виявлення дефектів у сталевих посудинах під тиском і трубопроводах.

Для виявлення внутрішніх (підповерхневих) несучільностей (дефектів) у металевих зварних з'єднаннях практично використовують лише два методи неруйнівного контролю – RT і UT. Найпростіший і найдоступніший спосіб збільшення якості контролю зварних з'єднань – це застосовувати послідовно обидва методи RT і UT. На розгортках зварних з'єднань (рис. 9) нанесені розміри та розташування несучільностей, виявлених RT і UT в ЗЗ ОТ та НТ КМПЦ енергоблоку №3 ЧАЕС у період СПР-97. Із 64 запротокольованих несучільностей 39 тріщиноподібних дефектів виявлено методами RT і UT ($UT \cap RT$), лише UT – 19 дефектів і лише RT – 6 дефектів.

Як впливає з рис. 9, збіг у виявленні (фіксації наявності є або немає) несучільностей за даними спільного контролю $UT \cap RT$ становить 61 % від загальної кількості запротокольованих дефектів. Це – досить високе значення, яке свідчить про хорошу результативність застосовуваних методів неруйнівного контролю (NTD) в аустенітних ЗЗ. У той же час, збіг результатів спільного контролю $UT \cap RT$ щодо виявлення як розташування, так і протяжності виявлених несучільностей становить лише 11 % (7 з 64, 1РГК-8 ст. 8, 1РГК-10 ст. 8, 1РГК-12 ст. 13, 2РГК-6 ст. 10, 2РГК-10 ст. 5, 2РГК-10 ст. 8, 2РГК-20 ст. 9) при повністю відсутній інформації щодо глибини дефектів. При цьому лише RT виявив 9 % і лише UT за методикою МЦУ-7-97 – 30 % від кількості фактичних дефектів. І хоча формально ультразвуковий контроль не виявляє 9 % дефектів, у той час як рентгенівський



Рис. 10. Загальний вигляд зварного з'єднання приварювання днища 1РГК-8, ст. 177, розрізаного на темплеті. Верхня частина темплетів звернена у бік труби РГК, нижня – у бік днища

RT не виявляє 30 %, слід пам'ятати, що UT не гарантує виявлення несучільностей на тлі відбиття від перевищення проплаву (посилення в кореневій частині шва). Метал аустенітних зварних швів вирізняється дендритною або колоніальною структурою зерен, орієнтованих у напрямку тепловідводу під час кристалізації. Така текстура формує просторово змінну анізотропію пружних властивостей матеріалу, що істотно впливає на поширення ультразвукових хвиль, а крупнозерниста структура зумовлює [16]:

- відхилення ультразвукового променя;
- зміну швидкості поширення хвиль залежно від напрямку;
- підвищене затухання сигналу;
- утворення структурного шуму.

Так, наприклад, у напірному трубопроводі 1РГК-8, ст. 177 ультразвуковим контролем (UT) був виявлений відбивач завдовжки 468 мм. З метою визначення фактичних розмірів дефекту була вирізана «котушка». Після її дезактивації та відповідної розмітки «котушка» розрізалася на темп-

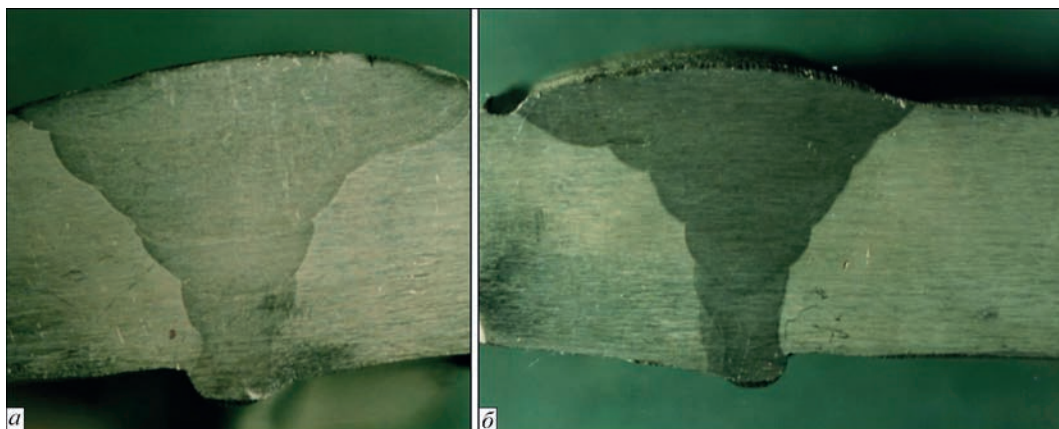


Рис. 11. Профіль ЗЗ ст. 177 напірного трубопроводу 1РГК-8 у місцях різку темплету № 8 (а) та № 10 (б)

лети дисковою фрезою (товщина фрези 3 мм). Нумерація темплетів, що показана на рис. 10, використовувалася для ідентифікації фактичних розмірів при візуально-вимірному (VT) контролі. Виявлений УТ відбивач розташований у районі темплетів №№7–11, тоді як темплети №№6–11 охоплюють майже половину кола труби.

На рис. 11 показано профіль 33, виявлений на поверхнях різку темплетів за допомогою їх шліфування та подальшого травлення реактивом (1 частина HNO_3 + 2 частини HCl (царська горілка)), що дозволяло виявити контури та структуру зварного з'єднання в області кожного різку, а також тріщини, якщо вони були присутні. Як впливає з наведеного фото на рис. 11, в районі 33 ст. 177 напірного трубопроводу 1РГК-8 у місцях різку темплету №8 (рис. 11, а) та № 10 (рис. 11, б) у зварному шві та зоні термічного впливу поблизу лінії сплавлення (тобто у місцях, де зазвичай розвиваються тріщини МКРПН або IGSCC) тріщиноподібних дефектів не виявлено.

Факт наявності відбитого сигналу та відсутність тріщин може бути пояснений наявністю у шва великої викривленої поверхні у кореневій області (перевищення проплаву), що виступає понад 3 мм над внутрішньою поверхнею труби. Зрозуміло, що проблеми з помилками є як у рентгена, так і ультразвуку: рентген схильний пропускати тріщиноподібні дефекти, а ультразвуком важко відокремити кутовий відбивач, що утворений тріщиною, від перевищення проплаву. Крім того, аустенітні матеріали через особливості формування структури 33 мають знижену контролепридатність для ультразвуку, оскільки анізотропна та крупнозерниста структура металу шва призводить до викривлення траєкторії ультразвукових хвиль, значного розсіювання сигналу та зниження співвідношення сигнал/шум. В аустенітних трубопроводах Ду 300 ці фактори посилюються через:

- значну товщину стінки;
- складну геометрію багатопрохідного зварного шва та технологію його зварювання (MMA, TIG, SAW);
- обмежений доступ до поверхні контролю;
- наявність залишкових напружень.

Сучасний розвиток неруйнівного контролю пов'язаний з впровадженням високотехнологічних ультразвукових методів, здатних забезпечити підвищену ймовірність виявлення дефектів (Probability of Detection, POD [17–19]) у складних структурно-неоднорідних матеріалах, зокрема аустенітних зварних швах.

Одним із найперспективніших підходів є використання ультразвукового контролю з фазованими решітками (Phased Array Ultrasonic Testing, PAUT), який забезпечує електронне керування напрямком і фокусуванням ультразвукового пучка, що дозволяє підвищити чутливість до дефектів різної орієнтації та геометрії [20–23]. Завдяки можливості формування секторних сканів і використання багатоканальних перетворювачів PAUT забезпечує повнішу інформацію про форму та розміри дефектів у порівнянні з традиційними одноелементними перетворювачами. Дослідження показують, що застосування фазованих решіток дозволяє зменшити ймовірність пропуску дефектів і підвищити повторюваність результатів контролю.

Важливим доповненням до PAUT є метод дифракції часу прольоту (Time of Flight Diffraction, TOFD), який базується на реєстрації дифрагованих хвиль від вершин тріщин [24]. На відміну від традиційного амплітудного методу, TOFD забезпечує точніше визначення координат дефектів і меншою мірою залежить від їхньої орієнтації, що сприяє підвищенню достовірності оцінювання геометричних параметрів дефектів. Водночас відомі обмеження TOFD, зокрема наявність «мертвих зон» поблизу поверхні та донної частини зварного шва, які компенсуються комбінованим застосуванням PAUT та інших методів ультразвукового контролю.

Перспективним напрямом підвищення інформативності ультразвукового контролю є застосування алгоритмів SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique) та повноматричного захоплення сигналів (FMC), що дозволяють покращити просторову роздільну здатність зображення та зменшити вплив шумів. Порівняльні дослідження методів реконструкції, таких як Total Focusing Method (TFM), Reverse Time Migration (RTM) та Full Waveform Inversion (FWI), показують підвищення точності виявлення та класифікації дефектів за рахунок використання повної інформації про хвильове поле [25].

Для оптимізації параметрів контролю та аналізу взаємодії ультразвукових хвиль із дефектами широко використовується моделювання методом скінченних елементів (Finite Element Method, FEM). Чисельне моделювання дозволяє враховувати складну геометрію зварного шва, анізотропію матеріалу та особливості поширення хвиль, що сприяє підвищенню достовірності результатів контролю та створенню моделей POD. Застосування FEM дозволяє дослідити вплив частоти, кута введення хвиль і конфігурації перетворювачів

на чутливість методу та обґрунтувати вибір оптимальних параметрів контролю [12, 16].

Таким чином, результати сучасних досліджень підтверджують, що комплексне застосування методів PAUT, TOFD, низькочастотного ультразвуку, SAFT-реконструкції та чисельного моделювання поширення хвиль забезпечує підвищення ймовірності виявлення дефектів у зварних з'єднаннях аустенітних сталей порівняно з традиційними методами ультразвукового контролю, що дозволяє зменшити невизначеність результатів контролю та підвищити обґрунтованість оцінки технічного стану аустенітних трубопроводів.

Візуально-вимірний контроль (VT) реальних розмірів тріщини на доломах темплетів. З метою визначення фактичних похибок неруйнівних методів контролю, що застосовувались у СПР-97, було проведено візуально-вимірний контроль (VT) реальних розмірів тріщини на доломах темплетів.

Як правило, після дезактивації котушки, на якій експлуатаційним RT1 (просвічуванням через дві стінки) та/або UT згідно з методикою МЦУ-7-97 були виявлені протяжні несучільності, у лабораторних умовах на вирізаній котушці виконувалася контрольне панорамне гамма-просвічування через одну стінку RT2 або/та капілярний контроль РТ і розмітка дефектних ділянок. Вирізані «котушки» трубопроводів з дефектними зварними з'єднаннями завдовжки до 180 мм розрізалися на темплети завширшки по хорді 15...50 мм і піддавалися долому на випробувальній машині за схемою триточкового згину з навантаженням посередині прольоту (по осі зварного шва). Після долому темплетів проводилися вимірювання довжини (з

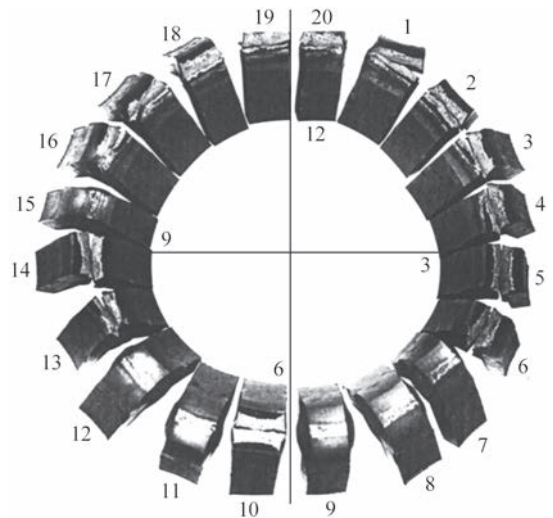


Рис. 12. Розташування темплетів, вирізаних із котушки Н15 ст. 5

урахуванням ширини різа фрези 3 мм) та глибини дефектів. Вимірювання проводили з кроком 5 мм по осі шва. Похибка вимірювань була не більше ± 1 мм за довжиною дефекту та $\pm 0,5$ мм за його глибиною. У табл. 4 наведено результати за довжиною і місцезнаходженням несучільностей, виявлених експлуатаційним RT1, UT, контрольною панорамною просвіткою RT2 і прямими вимірами VT.

На прикладі опускного трубопроводу Н-15 ст. 5 (рядок № 8 у табл. 4) проілюструємо обсяг виконаних досліджень з ідентифікації розташування та визначення розмірів тріщиноподібних дефектів. За результатами експлуатаційного RT1 (просвічування через дві стінки у складі обладнання) неприпустимих дефектів не виявлено (ДНО). Ультразвуковий контроль за методикою МЦУ-7-97 виявив відбивач з амплітудою $A_{бр} + 8$ дБ, що відповідає несучільності $L = 130$ мм, яка розташована на ци-

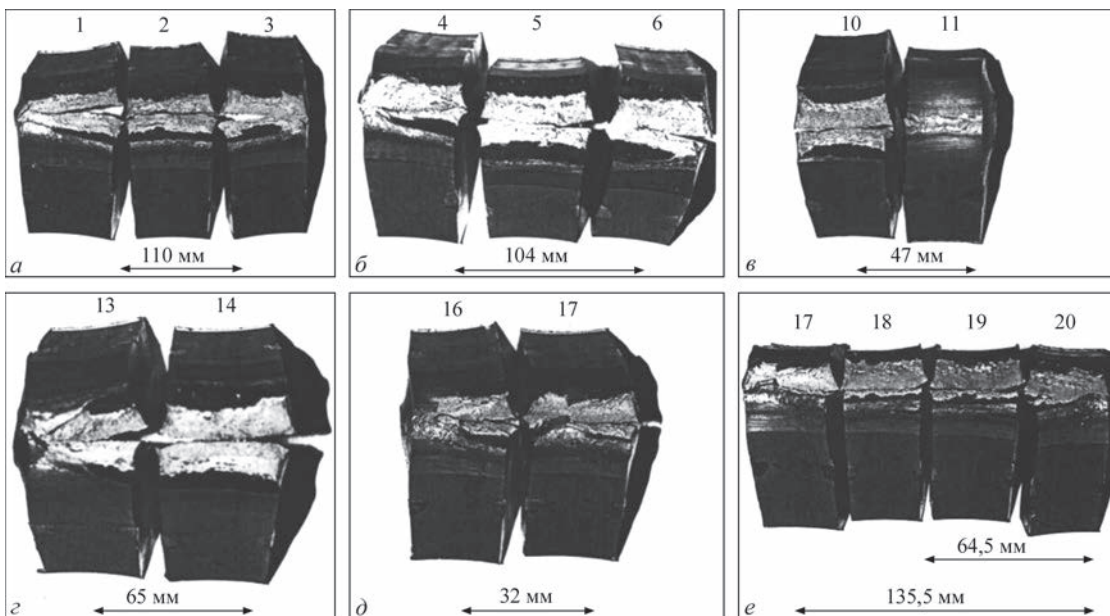


Рис. 13. Фото зруйнованих темплетів із виявленими тріщинами

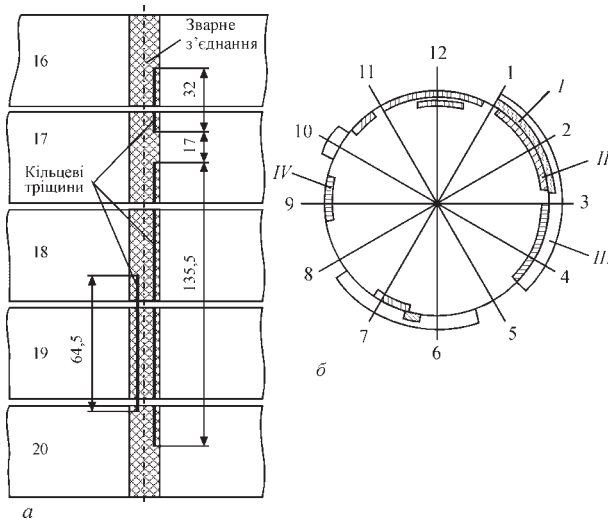


Рис. 14. Схема розташування тріщин у темплетях №№ 16–20 (а) і схема розташування дефектів в 33 ст. 5 ОТ Н-15 (№ 8 у табл. 4), виявлених різними методами (б): I – УТ, L = 130 мм; II – РТ, L = 25 мм; III – РТ2, L = 265, 187, 40 мм; IV – VT, L = = 135, 110, 104, 64,5, 62, 47, 32 мм

ферблаті годинника $\Omega:(1^{00}, 2^{50})$. Після вирізки та дезактивації котушки завдовжки 90 мм були виконані в лабораторних умовах РТ2 (панорамне просвічування), яке зафіксувало тріщини: 1. L = 265 мм, $\Omega:(1^{00}, 4^{40})$; 2. L = 187 мм, $\Omega:(5^{10}, 7^{40})$; 3. L = 40 мм, $\Omega:(9^{45}, 10^{20})$ та капілярний контроль (РТ) кореневої частини ЗЗ, що виявив лінійний індикаторний слід протяжністю 25 мм, розташований $\Omega:(6^{20}, 6^{30})$. З урахуванням цих результатів було проведено розрізання котушки на темплети завширшки 33...50 мм, рахуючи по внутрішній поверхні труби. Схему розташування темплетів після їх долому за схемою ритчочкового вигину наведено на рис. 12.

Після долому темплетів №№ 1–3 було виявлено тріщину завдовжки 110 мм і максимальною глибиною 8 мм (рис. 13, а), на темплетях №№ 4–6 – тріщину завдовжки 104 мм та максимальною глибиною 9,5 мм (рис. 13, б). Відстань між тріщинами на темплетях № 3 і № 4 склала 27 мм. Після долому темплетів №№ 10, 11 виявлено тріщину завдовжки 47 мм і максимальною глибиною 8 мм (рис. 13, в), на темплетях №№ 13, 14 – тріщину завдовжки 65 мм і максимальною глибиною 8,5 мм (рис. 13, з), на темплетях №№ 16, 17 – тріщину завдовжки 32 мм і максимальною глибиною 7,5 мм (рис. 13, д). Після долому темплетів №№ 17–20 виявлено дві паралельні тріщини – одну тріщину завдовжки 135,5 мм, другу на темплетях №№ 18–20 – завдовжки 64,5 мм і максимальною глибиною 8 мм (рис. 13, е).

Схему розташування тріщин на темплетях №№ 16–20 наведено на рис. 14, а, а схему розташуван-

ня дефектів, виявлених різними методами, ілюструє рис. 14, б.

Якщо порівнювати розташування та довжину несучільностей, виявлених контролерами УТ (УЗК по МЦУ 7-97), РТ2 (панорамне просвічування через одну стінку в лабораторних умовах), РТ (капілярний контроль корня ЗЗ) з фактичним розташуванням і розмірами тріщин, визначеними візуально-вимірвальним контролем (VT) (рис. 14, б), то для ЗЗ ст. 5 ОТ Н-15 (№ 8 у табл. 4) несучільність протяжністю УТ = 130 мм $\Omega:(1^{00}, 2^{50})$ підтверджується реальною тріщиною VT(1) = 110 мм, $\Omega:(1^{10}, 2^{45})$. Перебраковка за довжиною несучільностей становить 15 % при вельми коректному визначенні місця розташування даного дефекта, але реальні тріщини VT(2) = 104 мм, $\Omega:(3^{10}, 4^{30})$; VT(3) = 32 мм, $\Omega:(10^{20}, 10^{50})$; VT(4) = 47 мм, $\Omega:(6^{35}, 7^{10})$; VT(5) = 62 мм, $\Omega:(8^{45}, 9^{35})$; VT(6) = 135 мм, $\Omega:(11^{05}, 12^{50})$ і VT(7) = 64,5 мм, $\Omega:(11^{45}, 12^{30})$ залишилися не поміченими контролерами УТ, хоча максимальна глибина цих тріщин досягала 9,5 мм або 40 % від товщини стінки труби.

Рентгеновський експлуатаційний контроль (РТ1) дефектів взагалі не виявив (ДНО), а панорамне просвічування через одну стінку в лабораторних умовах (РТ2) виявив несучільність завдовжки L = 265 мм, $\Omega:(1^{00}, 4^{40})$, що підтверджується реальними тріщинами VT(1) = 110 мм, $\Omega:(1^{10}, 2^{45})$ + VT(2) = 104 мм, $\Omega:(3^{10}, 4^{30})$ = 214 мм. Перебраковка за довжиною несучільностей становить близько 20 % при вельми коректному визначенні місця розташування реальних тріщин. Несучільність завдовжки L = 187 мм, $\Omega:(5^{10}, 7^{40})$ підтверджується реальною тріщиною VT(4) = 47 мм, $\Omega:(6^{35}, 7^{10})$ та даними капілярного контролю РТ = 25 мм, $\Omega:(6^{20}, 6^{30})$, що також виконувався в лабораторних умовах. При цьому перебраковка по РТ2 становить майже 75 %, а недобраковка по РТ – майже 47 %. Зауважимо, що навіть у лабо-

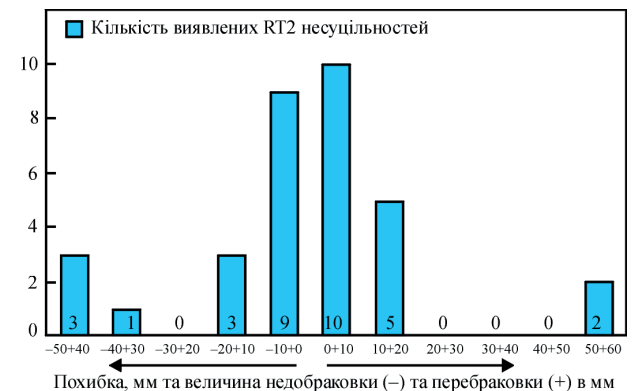
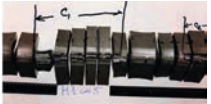


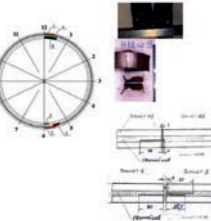

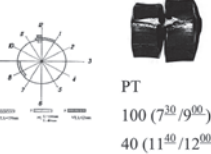





Рис. 15. Похибка за даними контрольного панорамного просвічування РТ2 та прямих вимірів VT при визначенні довжини тріщин в опускних трубопроводах КМЩЦ енергоблоку № 3 ЧАЕС

Таблиця 4. Протяжність тріщин в опускних трубопроводах КМПЦ енергоблоку № 3 ЧАЕС за даними експлуатаційного РТ1, УТ, лабораторного капілярного контролю РТ, контрольного панорамного просвічування РТ2 та прямих вимірів VT

№ з/п	Нитка і 33 (стику)	Протяжність за результатами експлуатаційного РТ1	Протяжність за результатами експлуатаційного УТ. Довжина × максимальна глибина, мм (розташування, год ^{аб})	Протяжність за результатами панорамного просвічування РТ2, мм або дані капілярного контролю (РТ, довжина, мм і розташування, год ^{аб})	Реальна протяжність / максимальна глибина дефекта VT, мм. Схема розташування несутцільностей	Фото (схема) уламків темплетів
1	Н-1, ст. 5	100	Точ. ×15 (12 ⁰⁰) Точ. ×15 (6 ⁰⁰)	150 20 108 58	146 / 11 32 / 10 немає немає	
2	Н-2, ст. 5	250	225	Дані відсутні	150 / 8	
3	Н-8, ст. 6	40	Дані відсутні	50 25	55 / 8,5 28 / 8	
4	Н-12, ст. 9	45 (12 ⁰⁰ / 12 ³⁰)	50 (12 ⁰⁰ / 12 ³⁰) 23 (6 ⁰⁰ / 5 ⁵⁰) ОНО	50 (12 ⁰⁰ / 12 ³⁰) ДНО ДНО	36 / 9 (12 ⁰⁰ / 12 ³⁰) 55,5 / 7,5 (5 ³⁰ / 6 ⁰⁰) 32 і 9,5 (5 ²⁰ / 5 ⁴⁰)	
5	Н-14, ст. 5	30 20 10	Дані відсутні	40 110	40 / 5 58 / 6	
6	Н-14, ст. 6А	ДНО Утж<1,6	Абр + 8 дб; E = 150 мм (11 ³⁰ / 13 ⁰⁰)	Дані відсутні	23 / 7,5 (11 ⁴⁰ / 12 ⁰⁰)	
7	Н-15, ст. 4	50	Дані відсутні	100 90 + 45	82 / 7 117 / 7	
8	Н-15, ст. 5	ДНО	130 (1 ⁰⁰ / 2 ⁵⁰) Абр + 8 дб	265 187 40	135,5 / 9 (11 ⁰⁵ / 12 ⁵⁰) 110 / 8 (1 ¹⁰ / 2 ⁴⁵) 104 / 9,5 (3 ⁰⁰ / 4 ³⁰) 65 / 8,5 (8 ⁴⁵ / 9 ³⁵) 47 / 8 (6 ³⁵ / 7 ¹⁰) 32 / 7,5 (10 ²⁰ / 10 ⁵⁰)	Фото і схеми дивись нижче по тексту РТ = 23 мм (6 ²⁰ / 6 ³⁰)
9	Н-23, ст. 4	80	40×16 (3 ³⁰ / 3 ⁵⁰)	63	82 / 10	
10	Н-47, ст. 6	50	Дані відсутні	190 + 110 65 45 35 + 25	89 + 52 / 8 48 / 7 45 / 8 немає	
11	Н-50, ст. 6	120	Дані відсутні	90 + 10 40 + 25 40	98 / 8,5 61 / 8,5 22 / 6	
12	Н-53, ст. 3	70 (12 ⁰⁰ / 1 ³⁰)	Дані відсутні	75	75	

13	Н-53, ст. 6А	50	Дані відсутні	80 72	125 / 11 89 / 9	
14	Н-56, ст. 3	80 (7 ⁰⁰ / 8 ⁰⁰)	Дані відсутні	40 25 15	43 / 7,5 21 / 11 немає	
15	Н-56, ст. 8	120 50	Дані відсутні	65 + 10 20 10	82 / 4 19 / 3 немає	
16	Н-57, ст. 3	70 (12 ⁰⁰ / 1 ³⁰)	Дані відсутні	25 + 15	37 / 7	
17	Н-57, ст. 6А	70	70×14 (12 ⁰⁰ / 13 ⁰⁰)	90	128 / 9,5	
18	Н-58, ст. 9	100 50 40 25	Дані відсутні	55	47 / 11,5	
19	Н-59, ст. 4	50 40 35	50×14(2 ³⁰ / 3 ⁰⁰) 40×14 (9 ⁰⁰) ОНО	70; 45 35 25	73 ⁰⁰ / 9,5 38 / 8 57 / 7,5	
20	Н-61, ст. 5	15	Дані відсутні	25 ДНО 110 ДНО	23 / 7 13 / 5,5 154 / 8 10 / 6	
21	Н-62, ст. 6	30	Дані відсутні	30	43 / 9	
22	Н-64, ст. 6А	40	150×14 (12 ³⁰ / 2 ³⁰) Точ. × 14 (2 ⁰⁰)	100 100 90	141 / 9 93 / 9 90 / 7,5	

Примітка: *Дві тріщини, що зливаються в одну.

раторних умовах контролери РТ не помітили реальні тріщини VT(1) = 110 мм, Ω:(1¹⁰, 2⁴⁵), VT(2) = 104 мм, Ω:(3¹⁰, 4³⁰); VT(3) = 32 мм, Ω:(10²⁰, 10⁵⁰);

VT(5) = 62 мм, Ω:(8⁴⁵, 9³⁵); VT(6) = 135 мм, Ω:(11⁰⁵, 12⁵⁰) і VT(7) = 64,5 мм, Ω:(11⁴⁵, 12³⁰). Несуцільність завдовжки L = 40 мм, Ω:(9⁴⁵, 10²⁰), що виявлена панорамним просвічуванням через одну стінку в лабораторних умовах (RT2), закінчується там, де починається реальна тріщина VT(3) = 32 мм, Ω:(10²⁰, 10⁵⁰), а тріщини VT(6) = 135 мм, Ω:(11⁰⁵, 12⁵⁰) і VT(7) = 64,5 мм, Ω:(11⁴⁵, 12³⁰) не були виявлені жодним із NDT.

Аналізуючі дані, наведені в табл. 4, можна дійти висновку, що найкращі результати щодо визначення розташування та довжини реальних тріщин має панорамне просвічування через одну стінку в лабораторних умовах (RT2). Але навіть для нього похибка у визначенні довжини тріщини досить суттєва, що ілюструє рис. 15.

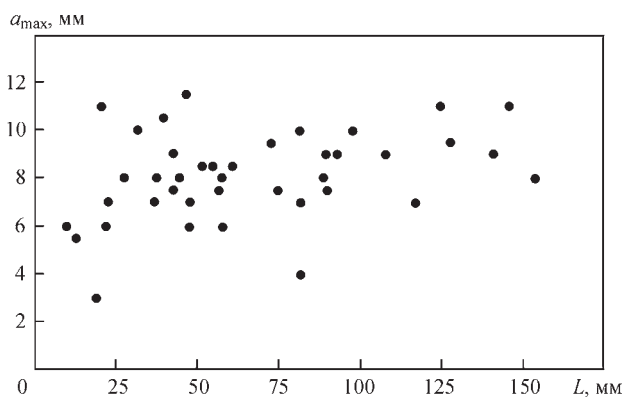


Рис. 16. Залежність довжини L виявлених реальних тріщин від їхньої максимальної глибини a_{max}

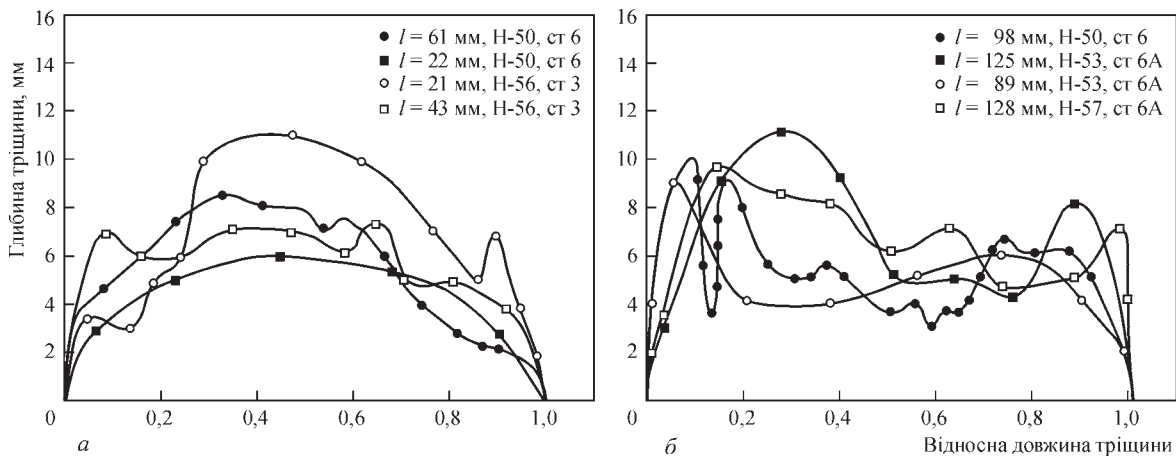


Рис. 17. Конфігурація фронту тріщин, що були виявлені: а – в 33 ст. 6 Н-50 для тріщин завдовжки 61 і 22 мм, ст. 3 Н-56 для тріщин завдовжки 21 і 43 мм; б – для тріщини завдовжки 98 мм у ст. 6 Н-50, тріщин завдовжки 125 і 89 мм у ст. 6А Н-53, тріщини завдовжки 128 мм у ст. 6А Н-57 опускних трубопроводів КМПЦ енергоблоку № 3 ЧАЕС відповідно (рядки №11, 13, 14 і 17 в табл. 4)

Результати прямих вимірів VT реальної довжини виявлених тріщин L від їхньої максимальної глибини a_{max} ілюструє рис. 16, а уявлення про конфігурацію фронту тріщин, що були виявлені в 33 ст. 6, ст. 6А, ст. 3 та ст. 6А опускних трубопроводів КМПЦ енергоблоку № 3 ЧАЕС Н-50, Н-53, Н-56 і Н-57, відповідно містить рис. 17.

Наведена на рис. 5, 8, 17 конфігурація фронту реальних тріщин, отримана в результаті прямих вимірів VT реальної довжини, від глибини тріщин свідчить, у першу чергу, про багатозародковий характер зародження тріщин МКРПН, а також про різну здатність розвитку міжкристалітного корозійного розтріскування від діючого напружено-деформованого стану та неоднорідність властивостей матеріалу в зоні зварного з'єднання. Про це також свідчать результати прямих вимірів VT для 39 тріщин, що наведені на рис. 16 та в табл. 4. Максимальна глибина виявлених тріщин не перевищувала 12 мм, тобто 3/4 від номінальної товщини стінки труби, а відношення a_{max}/L , що характеризує форму тріщини, змінюється в широкіх границях від 0,05 до 0,55 і пов'язано з кількістю зародків для одної тріщини (чим їх більше, тим a_{max}/L менше) та рівнем напруження в ослабленому тріщиною нетто-перерізі (чим він вищий, тим швидше розвивалась тріщина за механізмом МКРПН від основного зародка, лишаючи інші неактивними).

Оцінка достовірності NDT. Одним із основних кількісних показників достовірності неруйнівного контролю є ймовірність виявляємості дефектів (Probability of Detection, POD). Даний показник вирізняє імовірність того, що дефект заданого типу й розміру буде виявлений обраним методом контролю за визначених умов проведення випробувань. Методологія оцінювання POD

широко застосовується при кваліфікації методик контролю, атестації обладнання й аналізі надійності технічної діагностики відповідальних конструкцій. Нормативно-технічна база забезпечення достовірності результатів неруйнівного контролю формується багаторівневою системою стандартів ISO, EN, ASTM та національних документів [4–11, 17–19, 26, 27]. Основними інструментами підтвердження достовірності є:

- сертифікація персоналу [26];
- статистичний аналіз POD [17–19];
- стандартизація методик контролю [4–11];
- метрологічна простежуваність вимірювань [15];
- система управління якістю випробувань [27].

Комплексне застосування цих документів дозволяє мінімізувати ризик хибних результатів і підвищити надійність технічної діагностики.

Для узагальнених уявлень про виявляємість дефектів (POD) і достовірність використовуваних методів неруйнівного контролю скористаємось найбільш інформативними результатами контролю, що представлені рядками №№ 4, 6, 8 у табл. 4 та визначимо формальне значення виявляємості POD ($V1$, $V2$) та достовірності (Д) неруйнівного контролю відповідно до положень РД ЕО 0488-03 «Методичні рекомендації щодо оцінки достовірності засобів та методик неруйнівного контролю» [28]. Формули розрахунку виявляємості та достовірності для нашого випадку можна записати таким чином:

$$V1 = (N_{NDT} \cap N_{VT}) / N_{VT}, V2 = (N_{NDT} \cap N_{VT}) / (N_{VT} + N_{\Pi}), Д = (N - N_{\Pi} - N_{\text{Н}}) / N,$$

де N_{NDT} – кількість виявлених елементів шва даним методом контролю; N_{Π} – кількість перебракованих елементів шва, тобто бездефектних елементів шва, визнаних дефектними; $N_{\text{Н}}$ – кількість пропущених дефектних елементів шва, недобраковка

Таблиця 5. Зведені дані розрахунку виявлення та достовірності NDT (№№ 4, 6, 8 табл. 4)

№ 33 НТ, вияв- ляємість дефектів (POD), V1 і V2, достовірність Д	VT (ета- лонна оцін- ка), мм	Оцінки результатів NDT, мм			
	VT	RT1	RT2	UT	PT
№ 9, Н-12	36	45 $L_{\Pi} = 9$	50 $L_{\Pi} = 14$	50 $L_{\Pi} = 14$	Не прово- дився
	55,5	Не виявлено, $L_{\Pi} = 55,5$	Не виявлено $L_{\Pi} = 55,5$	32,5 $L_{\Pi} = 23,5$	
	32	Не виявлено $L_{\Pi} = 32$	Не виявлено $L_{\Pi} = 32$	Не виявлено $L_{\Pi} = 32$	
$\Sigma: L_{VT}, L_{\Pi}, L_{\Pi}$	123,5	$L_{\Pi} = 9$	$L_{\Pi} = 14$	$L_{\Pi} = 14$	–
		$L_{\Pi} = 80$ (з урахуванням перекриття)	$L_{\Pi} = 80$ (з урахуванням перекриття)	$L_{\Pi} = 48$ (з урахуван- ням перекриття)	–
$L_{NDT} \cap L_{VT}$	–	36	36	68	–
$D = (L - L_{\text{нр}} - L_{\Pi}) / L$	–	0,91	0,91	0,93	–
$V1 = (L_{NDT} \cap L_{VT}) / L_{VT}$	–	0,29	0,29	0,55	–
$V2 = (L_{NDT} \cap L_{VT}) / (L_{VT} + L_{\Pi})$	–	0,27	0,26	0,49	–
№ 6а, Н-14	23	Не виявлено $L_{\Pi} = 23$	Не проводиться	150 $L_{\Pi} = 127$	1. 40, $L_{\Pi} = 17$ 2. 150, $L_{\Pi} = 150$
$\Sigma: L_{VT}, L_{\Pi}, L_{\Pi}$	$L_{VT} = 23$	$L_{\Pi} = 0$	–	$L_{\Pi} = 127$	$L_{\Pi} = 167$
		$L_{\Pi} = 23$	–	$L_{\Pi} = 0$	$L_{\Pi} = 0$
$L_{NDT} \cap L_{VT}$	–	0	–	23	23
D	–	0,98	–	0,88	0,84
V1	–	0	–	1	1
V2	–	0	–	0,15	0,12
№ 5, Н-15	110	Не виявлено $L_{\Pi} = 110$	265 $L_{\Pi} = 51$	130 $L_{\Pi} = 20$	Не виявлено $L_{\Pi} = 110$
	104	Не виявлено $L_{\Pi} = 104$		Не виявлено $L_{\Pi} = 110$	Не виявлено $L_{\Pi} = 104$
	47	Не виявлено $L_{\Pi} = 47$	187 $L_{\Pi} = 140$	Не виявлено $L_{\Pi} = 47$	25 $L_{\Pi} = 20, L_{\Pi} = 42$
	62	Не виявлено $L_{\Pi} = 62$	Не виявлено $L_{\Pi} = 62$	Не виявлено $L_{\Pi} = 62$	Не виявлено $L_{\Pi} = 62$
	32	Не виявлено $L_{\Pi} = 32$	Не виявлено $L_{\Pi} = 32$	Не виявлено $L_{\Pi} = 32$	Не виявлено $L_{\Pi} = 32$
	135	Не виявлено $L_{\Pi} = 135$	Не виявлено $L_{\Pi} = 135$	Не виявлено $L_{\Pi} = 135$	Не виявлено $L_{\Pi} = 135$
	64,5 Не врахо- вується	Не враховується	Не враховується	Не враховується	Не врахо- вується
$\Sigma: L_{VT}, L_{\Pi}, L_{\Pi}$	$L_{VT} = 490$	$L_{\Pi} = 0$	$L_{\Pi} = 191 + 40 = 231$	$L_{\Pi} = 26$	$L_{\Pi} = 20$
		$L_{\Pi} = 490$	$L_{\Pi} = 229$	$L_{\Pi} = 386$	$L_{\Pi} = 485$
$L_{NDT} \cap L_{VT}$	–	0	$110 + 104 + 47 = 261$	110	5
D	–	0,52	0,76	0,60	0,51
$V1 = (L_{NDT} \cap L_{VT}) / L_{VT}$	–	0	0,53	0,23	0,01
$V2 = (L_{NDT} \cap L_{VT}) / (L_{VT} + L_{\Pi})$	–	0	0,36	0,21	0,01
Усереднене для трьох зварних з'єднань:					
D	–	0,80	0,82	0,80	0,68
V1	–	0,1	0,41	0,59	0,51
V2	–	0,1	0,31	0,28	0,07

(пропуск); N_{VT} – кількість елементів шва з реальними дефектами за даними VT (еталонна оцінка); N – загальна кількість елементів шва.

Під елементом шва розуміється ділянка шва (його протяжність), яка дорівнює протяжності мі-

німального дефекту, що визначається. Наприклад, в ультразвуковому контролі під таким дефектом можна розуміти деякий граничний відбивач або нормативне значення протяжності, що мінімально враховується. Для нашого конкретного розрахунку

ці формули можна переписати згідно з протяжністю виявлених дефектів:

$$V1 = (L_{NDT} \cap L_{VT}) / L_{VT}, V2 = (L_{NDT} \cap L_{VT}) / (L_{VT} + L_{\Pi}), D = (L - L_{\Pi} - L_{\Pi}) / L,$$

де L_{VT} – загальна довжина реальних дефектів за даними VT (еталонна оцінка); L_{NDT} – загальна довжина дефектів, що визначена методом неруйнівного контролю; L_{Π} – загальна довжина перебракування; L_{Π} – загальна довжина недобраковки (пропуск); L – протяжність шва (1020 мм). Результати розрахунків наведено в табл. 5.

Отримані результати ґрунтуються на комплексних обстеженнях трьох зварних з'єднань. Ці обстеження містять, крім неруйнівного контролю, металографічні дослідження швів VT. Тому виник рідкісний випадок оцінити кількісно можливості методів неруйнівного контролю, порівняти дані методів NDT з прямими вимірами VT. Наведені результати та засновані на них висновки не можуть вважатись статистично представницькими через їхній невеликий обсяг, однак, сподіваємось, будуть корисними для прийняття зважених рішень у повсякденній практиці фахівців служб неруйнівного контролю, нагляду, діагностики тощо.

Основними напрямками покращення достовірності NDT є підвищення кваліфікації персоналу, вдосконалення методів статистичного аналізу, розвиток метрологічного забезпечення та гармонізація національних стандартів з міжнародними вимогами.

Висновки

1. Наведено результати експлуатаційного радіографічного контролю (RT), виконаного в СПР-97 на 1451 зварному з'єднанні опускних, напорних і трубопроводах САОР Ду 300 енергоблоку № 3 ЧАЕС. Виявлено 268 дефектів, що становить 18 % дефектності зварних з'єднань, із них 208 (14 %) – тріщин і 60 (4 %) – дефектів зварного шва (усадка кореня шва, непровари, шлакові включення тощо).

2. Експлуатаційний ультразвуковий контроль (UT), виконаний за методикою МЦУ-7-97 у період СПР-97 на зварних з'єднаннях трубопроводів Ду 300 енергоблоку № 3 ЧАЕС, що пройшли RT із позитивними результатами, виявив ще 183 тріщиноподібних дефектів, із яких призначено до ремонту та відремонтовано 70 зварних з'єднань.

3. Виконано порівняльний аналіз фіксації розмірів (довжини тріщини) та розташування несутцільностей, виявлених RT і UT у зварних з'єднаннях опускних і напорних трубопроводів КМПЩ енергоблоку № 3 ЧАЕС. Із 64 запроTOCOLьованих несутцільностей 39 тріщиноподібних дефектів ви-

явлено методами RT і UT ($UT \cap RT$), лише UT – 19 несутцільностей і RT – 6 дефектів.

4. Для опускних трубопроводів КМПЩ енергоблоку № 3 ЧАЕС наведено результати прямих вимірів VT протяжності та глибини тріщин, отриманих на зруйнованих темплетях, у порівнянні з даними експлуатаційного RT1, UT, лабораторного капілярного контролю RT і контрольного панорамного просвічування RT2. Наведена конфігурація фронту реальних тріщин, що отримана у результаті прямих вимірів VT реальної довжини від глибини тріщин, свідчить, у першу чергу, про багатозародковий характер зародження тріщин МКРПН, а також про різну здатність розвитку міжкристалітного корозійного розтріскування від діючого напружено-деформованого стану та неоднорідності властивостей матеріалу в зоні зварного з'єднання.

5. На основі комплексного обстеження отримано значення виявляємості дефектів і достовірності результатів різних методів NDT – експлуатаційного RT1 і UT, панорамного просвічування через одну стінку в лабораторних умовах RT2 та капілярного RT. Отримано кількісні значення для достовірності методів експлуатаційного неруйнівного контролю – RT та UT на рівні 0,8, а для виявляємості – 0,1 і 0,28 відповідно.

Список літератури

1. Тороп В.М., Рабкіна М.Д., Давидов Є.О. (2025) Ретроспективний погляд на розвиток дефектів у зварних з'єднаннях аустенітної сталі Чорнобильської АЕС. У кн.: *Зварювання та споріднені технології для відновлення України*. Тези допов. конф. під ред. О.Т. Зельніченка. Київ, ТОВ «Видавничий Дім «Патон», 105–107. DOI: <https://doi.org/10.37434/WRT2025.28>
2. Angeliu, T.M., Andresen, P.L., Sutliff, J.A., Horn, R.M. (1999) Intergranular stress corrosion cracking of unsensitized stainless steel in BWR environments. *Proc. Ninth Int. Symp. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water reactors*, AIME.
3. (1975) *US NRC Pipe Crack Study Group. Investigation and Evaluation of Cracking in Austenitic Strainless Steel Piping of BWR Plants*. NUREG-75/061.
4. ГОСТ 7512-82. *Контроль неруйнуючий. З'єднання зварні. Радіографічний метод*. (Скасовано згідно з наказом від 25.12.2015 № 209. Термін скасування перенесено згідно з наказом від 24.01.2018 № 15).
5. ПНАЭ Г-7-017-89. *Унифицированная методика контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Радиографический контроль*. М., Госатомэнергонадзор СССР.
6. ПК 1514-72. *Правила контроля сварных соединений и наплавки узлов и конструкций атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок*. М., Энергоатомиздат (СОУ НАЕК 160:2020. *Обеспечение технической безопасности. Контроль качества основного металла, сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов атомных электрических станций с реакторами ВВЭР. Технические требования вместо ПК 1514-72 и ПНАЭ Г-010-89. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавки. Правила контроля*).
7. ПНАЭ Г-7-010-89. *Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и*

- наплавки. *Правила контролю* (СОУ НАЕК 160:2020. *Обеспечение технической безопасности. Контроль качества основного металла, сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов атомных электрических станций с реакторами ВВЭР. Технические требования.* Киев).
8. ПНАЭ Г-7-008-89. *Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок* (СОУ НАЕК 158:2020. *Обеспечение технической безопасности. Технические требования к устройству и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных электрических станций с реакторами ВВЭР, НП 306.2.227-2020. Общие требования безопасности к устройству и эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных станций* вместо ПНАЭ Г-7-008-89, ПНАЭ Г-7-009-89).
 9. ПНАЭ Г-7-009-89. *Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и наплавка. Основные положения.*
 10. МТ-34-70-023-86. *Методика ультразвукового контроля аустенитных сварных стыковых соединений с толщиной стенки 10...25 мм в процессе монтажа и эксплуатации атомных станций.*
 11. DSTU EN ISO 17635:2018. *Неруйнівний контроль зварних з'єднань. Загальні правила для металевих матеріалів* (EN ISO 17635:2016, IDT; ISO 17635:2016, IDT)
 12. Chassignole, B., Guerjouma, R.El., Ploix, M.-A., Fouquet, T. (2010) Ultrasonic and structural characterization of anisotropic austenitic stainless steel welds: Towards a higher reliability in ultrasonic non-destructive testing. *NDT & E International*, 43(4), 273–282. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.12.005>
 13. МЦУ-7-97. *Методика ультразвукового контроля аустенитных сварных соединений Ø325×15 атомных электростанций с реакторами РБМК.* М., НПО ЦНИИТ-МАШ.
 14. Разыграев Н.П., Разыграев А.Н. (2021) Ультразвуковой контроль головными волнами сварных соединений трубопроводов Ду-300 на Чернобыльской АЭС. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 1, 48–58.
 15. Doctor, S., Jehenson, P. (1988) Description of the PISC III Round Robin Test on Cast Stainless Steel (CCSSRRT) and evaluation of results. *Intern. J. of Pressure Vessels and Piping*, 35(1-4), 3–15 DOI: [https://doi.org/10.1016/0308-0161\(88\)90087-7](https://doi.org/10.1016/0308-0161(88)90087-7)
 16. Anderson, M.T., Diaz, A.A., Cinson, A.D., Crawford, S.L., Cumbledge, S.E., Doctor, S.R., Denslow, K.M., Ahmed, S. (2011) *An assessment of ultrasonic techniques for far-side examinations of austenitic stainless steel piping welds.* NUREG/CR-7113, PNNL-19353, NRC Job Code N6398.
 17. ASTM International (2018) *ASTM E2862 Standard Guide for Probability of Detection Analysis for Hit/Miss Data.*
 18. Department of Defense (2009) *MIL-HDBK-1823A Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment.*
 19. ENIQ (2010) *Recommended Practice 2 – Inspection qualification methodology.*
 20. Uzun, H., Gustiani, D. (2024) Review of phased array ultrasonic testing of weld joints. *J. of Marine and Engineering Technology*, 4(2), 77–92. DOI: <https://doi.org/10.58771/joinmet.1525521>
 21. Kim, Y., Cho, S., Park, I.K. (2021) Analysis of flaw detection sensitivity of phased array ultrasonics in austenitic steel welds according to inspection conditions. *Sensors*, 21(1), 242. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21010242>
 22. Li, C. et al. (2025) Study on phased array ultrasonic testing techniques for austenitic stainless steel butt welds. *J. of Fusion Energy*, 44, 13. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10894-025-00475-6>
 23. Kumar, S., Menaka, M., Venkatraman, B. (2021) Performance comparison of phased array transducers for inspection of dissimilar welds on nuclear reactor components. *Annals of Nuclear Energy*, 162, 108482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108482>
 24. Duan, J.X. et al. (2018) Hybrid ultrasonic TOFD imaging of weld flaws. *J. of Nondestructive Evaluation*, 37, 23. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10921-018-0476-2>
 25. Bürchner, T. et al. (2025) Quantitative comparison of the total focusing method, reverse time migration, and full waveform inversion for ultrasonic imaging. *Ultrasonics*, 155, 107705. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2025.107705>
 26. ISO 9712 (2021) *Non-destructive testing – Qualification and certification of NDT personnel.*
 27. EN ISO 17635 (2016) *Non-destructive testing of welds – General rules.* European Committee for Standardization.
 28. РД ЭО 0488-03 (2003) *Методические рекомендации по оценке достоверности средств и методик неразрушающего контроля.* Руководящий документ. М.

References

1. Torop, V.M., Rabkina, M.D., Davydov, Ye.O. (2025) Retrospective look at development of defects in austenitic steel welded joints of Chornobyl NPP. In book: *Welding and related technologies for reconstruction of Ukraine*. Abstr. of Conf. Papers. Ed. by O.T. Zelnichenko. Kyiv, Paton Publishing House, 105–107 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/WRT2025.28>
2. Angeliu, T.M., Andresen, P.L., Sutliff, J.A., Horn, R.M. (1999) Intergranular stress corrosion cracking of unsensitized stainless steel in BWR environments. *Proc. Ninth Int. Symp. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water reactors, AIME.*
3. (1975) *US NRC Pipe Crack Study Group. Investigation and Evaluation of Cracking in Austenitic Stainless Steel Piping of BWR Plants.* NUREG–75/061.
4. GOST 7512-82. *Non-destructive testing. Welded joints. Radiography method* (Cancelled in keeping with order of 25.12.2015, No 209. Cancellation deadline postponed according to order of 24.01.2018 No 15) [in Ukrainian].
5. PNAE G-7-017-89. *Unified procedure for control of the base materials (semi-finished products), welded joints and surfacing in NPP equipment and pipelines.* Radiografic Kontrol. Moscow, USSR Gosatomenergoadzor [in Russian].
6. PK 1514-72. Rules of control of welded joints and surfacing of components and structures on nuclear power plants, test and research nuclear reactors and plants. Moscow, Energoatomizdat (SOU NAEK 160:2020. *Ensuring engineering safety. Quality control of base metal, welded joints and surfacing in equipment and piping of nuclear power plants with WWER reactors.* Technical requirements is in effect in Ukraine instead of PK 1514-72 and PNAE G-010-89. *Equipment and piping of nuclear power plants. Rules of control*) [in Russian].
7. PNAE G-010-89. *Equipment and piping of nuclear power plants. Welded joints and surfacing* (SOU NAEK 160:2020. *Ensuring engineering safety. Quality control of base metal, welded joints and surfacing in equipment and piping of nuclear power plants with WWER reactors. Technical requirements*) [in Russian].
8. PNAE G-7-008-89. Rules for the design and safe service of equipment and piping on nuclear power plants (SOU NAEK 158:2020. *Ensuring engineering safety. Technical requirements for the design and safe operation of equipment and piping on nuclear power plants with WWER reactors* and NP 306.2.227-2020. *General safety requirements to the design and operation of equipment and piping of nuclear power plants* instead of PNAE G-7-008-89, PNAE G-7-009-89 are in effect in Ukraine) [in Russian].
9. PNAE G-7-009-89. *Equipment and piping of nuclear power plants. Welding and surfacing. Main principles* [in Russian].
10. МТ-34-70-023-86. *Procedure for ultrasonic testing of austenitic welded butt joints with wall thickness of 10-25 mm during nuclear power plant mounting and operation* [in Russian].
11. DSTU ISO 17635:2018 (EN ISO 17635:2016, IDT; ISO 17635:2016, IDT) *Non-destructive testing of welded joints. General rules for metallic materials* [in Ukrainian].
12. Chassignole, B., Guerjouma, R.El., Ploix, M.-A., Fouquet, T. (2010) Ultrasonic and structural characterization of anisotropic austenitic stainless steel welds: Towards a higher reliability in ultrasonic non-destructive testing.

- NDT & E International*, 43(4), 273–282. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.12.005>
13. MtSU-7-97. *Methods of ultrasonic control of austenitic welded joints Ø325×15 of nuclear power plants with RBMK reactors*. Moscow, NGO TsNIITMASH [in Russian].
 14. Razygraev, N.P., Razygraev, A.N. (2021) Ultrasonic head wave control of welded connections of Du-300 pipelines at Chernobyl nuclear power plant. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, 1, 48–58 [in Russian].
 15. Doctor, S., Jehenson, P. (1988) Description of the PISC III Round Robin Test on Cast Stainless Steel (CCSSRRT) and evaluation of results. *Intern. J. of Pressure Vessels and Piping*, 35(1-4), 3–15 DOI: [https://doi.org/10.1016/0308-0161\(88\)90087-7](https://doi.org/10.1016/0308-0161(88)90087-7)
 16. Anderson, M.T., Diaz, A.A., Cinson, A.D., Crawford, S.L., Cumblidge, S.E., Doctor, S.R., Denslow, K.M., Ahmed, S. (2011) *An assessment of ultrasonic techniques for far-side examinations of austenitic stainless steel piping welds*. NUREG/CR-7113, PNNL-19353, NRC Job Code N6398.
 17. ASTM International (2018) *ASTM E2862 Standard Guide for Probability of Detection Analysis for Hit/Miss Data*.
 18. Department of Defense (2009) *MIL-HDBK-1823A Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment*.
 19. ENIQ (2010) *Recommended Practice 2 – Inspection qualification methodology*.
 20. Uzun, H., Gustiani, D. (2024) Review of phased array ultrasonic testing of weld joints. *J. of Marine and Engineering Technology*, 4(2), 77–92. DOI: <https://doi.org/10.58771/joimmet.1525521>
 21. Kim, Y., Cho, S., Park, I.K. (2021) Analysis of flaw detection sensitivity of phased array ultrasonics in austenitic steel welds according to inspection conditions. *Sensors*, 21(1), 242. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21010242>
 22. Li, C., et al. (2025). Study on phased array ultrasonic testing techniques for austenitic stainless steel butt welds. *J. of Fusion Energy*, 44, 13. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10894-025-00475-6>
 23. Kumar, S., Menaka, M., Venkatraman, B. (2021) Performance comparison of phased array transducers for inspection of dissimilar welds on nuclear reactor components. *Annals of Nuclear Energy*, 162, 108482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108482>
 24. Duan, J. X., et al. (2018) Hybrid ultrasonic TOFD imaging of weld flaws. *J. of Nondestructive Evaluation*, 37, 23. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10921-018-0476-2>
 25. Büchner, T., et al. (2025) Quantitative comparison of the total focusing method, reverse time migration, and full waveform inversion for ultrasonic imaging. *Ultrasonics*, 155, 107705. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2025.107705>
 26. ISO 9712 (2021) *Non-destructive testing – Qualification and certification of NDT personnel*.
 27. EN ISO 17635 (2016) *Non-destructive testing of welds – General rules*. European Committee for Standardization.
 28. RD EO 0488-03 (2003) *Methodological recommendations for assessing the reliability of means and methods of non-destructive testing*. Guidance document. Moscow [in Russian].

ANALYSIS OF THE RESULTS OF NON-DESTRUCTIVE TESTING OF AUSTENITIC WELDED JOINTS OF THE 3TH POWER UNIT OF THE CHORNOBYL NPP

V.M. Torop, Ye.O. Davydov, M.D. Rabkina

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.: v.torop@gmail.com

April 26, 2026 marked the 40th anniversary of the catastrophic explosion, which occurred in the 4th power unit of the Chernobyl NPP (ChNPP). Since then, a colossal amount of diverse work has been carried out to eliminate the consequences of the accident. To support the required level of safety and reliability of pipelines with a diameter of 325 mm (Dn 300) and wall thickness of 16 mm the Chernobyl Power Plant developed a special Program of diagnostic and repair-restoration operations. According to this Program, a considerable scope of radiographic (RT), ultrasonic (UT), penetrant (PT) and visual-measuring testing (VT) of welded joints of Dn 300 pipelines made from 08X18H10T austenitic steel has been performed in the period from 1997 to 2005. Despite the fact that more than 20 years have passed since then, the NDT methods are based on the same physical principles, and practically the same methodological approaches to NDT are used. Therefore, analysis of the results of a large scope of operational control is very useful for understanding the reliability of NDT methods, used in modern daily practice. It should be noted that the work on analysis of the test results was performed as a separate task, and not specifically for evaluation and comparison of NDT methods, so that the analysis presented in the paper is objective, retrospective and unbiased, i.e. it reflects the possible and not the desirable result. Ref. 15, Table. 5, Fig. 17.

Keywords: NDT reliability, austenitic welded joints, radiographic (RT), ultrasonic (UT), penetrant (PT), visual-measuring (VT) testing, actual dimensions of the crack

ORCID

V.M. Torop – <https://orcid.org/0000-0002-8807-9811>, С.О. Давидов – <https://orcid.org/0000-0003-3470-2329>,

М.Д. Рабкіна – <https://orcid.org/0000-0003-3498-0716>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛІСТУВАННЯ

V.M. Torop

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: v.torop@gmail.com

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

Тороп В.М., Давидов С.О., Рабкіна М.Д. (2026) Аналіз результатів неруйнівного контролю аустенітних зварних з'єднань енергоблоку № 3 Чорнобильської АЕС. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 02, 17–35.

DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2026.02.03>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk>

Отримано 23.03.2026

Отримано у переглянутому вигляді 08.04.2026

Підписано до друку 12.05.2026

Оприлюднено 30.06.2026