

УДК 620.179

ЗАСТОСУВАННЯ КОМБІНОВАНИХ МЕТОДІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ТА АНАЛІЗУ ДЕФЕКТІВ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПОСУДИН ПІД ТИСКОМ

Д.В. Лаухін¹, В.В. Животович², Д.І. Гузенко³

¹д.т.н., професор, e-mail: Laukhin.D.V@nmu.one

²технічний директор

³аспірант, інженер

^{1,3}Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна

^{2,3}ТОВ СП «Товариство технічного нагляду ДІЕКС», Дніпро, Україна

Анотація. У роботі досліджено якість зварного з'єднання обичайки з днищем посудини під тиском, виготовленої зі сталі P355NL2, із застосуванням комбінованих методів неруйнівного контролю. Використано візуально-вимірвальний, капілярний та радіографічний методи для виявлення поверхневих і внутрішніх дефектів. Встановлено наявність підрізів, пористості, непроварів і поперечних тріщин. Проведено аналіз причин їх утворення, пов'язаних із порушенням технології зварювання, формуванням крихких структур у зоні термічного впливу та дією залишкових напружень. Показано, що комплексне застосування методів неруйнівного контролю дозволяє підвищити достовірність діагностики та забезпечити надійність експлуатації конструкції.

Ключові слова: неруйнівний контроль, зварні з'єднання, посудини під тиском, радіографічний контроль, капілярний контроль, дефекти зварювання, зона термічного впливу.

APPLICATION OF COMBINED NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS FOR DETECTION AND ANALYSIS OF DEFECTS IN WELDED JOINTS OF PRESSURE VESSELS

D.V. Laukhin¹, V.V. Zhyvotovych², D.I. Huzenko³

¹Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: Laukhin.D.V@nmu.one

²Technical Director

³Postgraduate Student, Engineer

^{1,3}National Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

^{2,3}LLC JV "DIEKS Technical Supervision Society", Dnipro, Ukraine

Abstract. This study investigates the quality of the welded joint between the shell and the head of a pressure vessel made of P355NL2 steel, using a combination of non-destructive testing methods. Visual and dimensional inspection, penetrant testing and radiographic testing were employed to detect surface and internal defects. The presence of undercuts, porosity, lack of fusion and transverse cracks was established. An analysis was carried out of the causes of their formation, linked to violations of welding technology, the formation of brittle

structures in the heat-affected zone and the action of residual stresses. It is shown that the comprehensive application of non-destructive testing methods allows for an increase in the reliability of diagnostics and ensures the operational reliability of the structure.

Keywords: non-destructive testing, welded joints, pressure vessels, radiographic testing, penetrant testing, welding defects, heat-affected zone.

Вступ. Забезпечення надійності зварних з'єднань є критичним для посудин, що працюють під тиском, де з'єднання обичайки з днищем є однією з найбільш навантажених та відповідальних зон. Попри досконалість сучасних технологій, у зварних швах можуть виникати небезпечні дефекти (тріщини, непровари, пори), що загрожують аваріями та значними збитками. Своєчасна діагностика за допомогою методів неруйнівного контролю дозволяє оцінити стан конструкції без порушення її цілісності [1].

Для дослідження якості з'єднання елементів виробу зі сталі P355NL2 – низьколегованої сталі з підвищеною ударною в'язкістю, що визначає її застосування для роботи при знижених температурах [2] – було застосовано комбінований підхід. Використання окремих методів неруйнівного контролю таких як візуально-вимірний контроль (VT), магнітопорошковий контроль (MT), капілярний контроль (PT), ультразвуковий контроль (UT), радіографічний контроль (RT) має свої обмеження, тому їх поєднання підвищує достовірність результатів [3].

Мета роботи полягає у дослідженні ефективності комбінованого застосування методів неруйнівного контролю для виявлення та аналізу поверхневих і внутрішніх дефектів зварних з'єднань посудин під тиском зі сталі P355NL2, а також у встановленні основних технологічних і експлуатаційних чинників їх утворення з метою підвищення надійності та безпеки експлуатації конструкцій.

Матеріал і результат досліджень.

Результати контролю та аналіз дефектів

У ході дослідження було застосовано декілька етапів перевірки. Капілярний (PT) та візуально-вимірний (VT) контроль дозволили виявити (Рис. 1) та локалізувати поверхневі дефекти, такі як подрізи зварного шва, пористість та поперечні тріщини.



Рис.1. – Індикація дефектів за допомогою капілярного контролю (РТ)

Цифрова радіографія (RT) системою GO-SCAN забезпечила візуалізацію внутрішньої структури, дозволила виявити ознаки непроварів та внутрішніх пор, які були недоступні для поверхневих методів (Рис. 2).

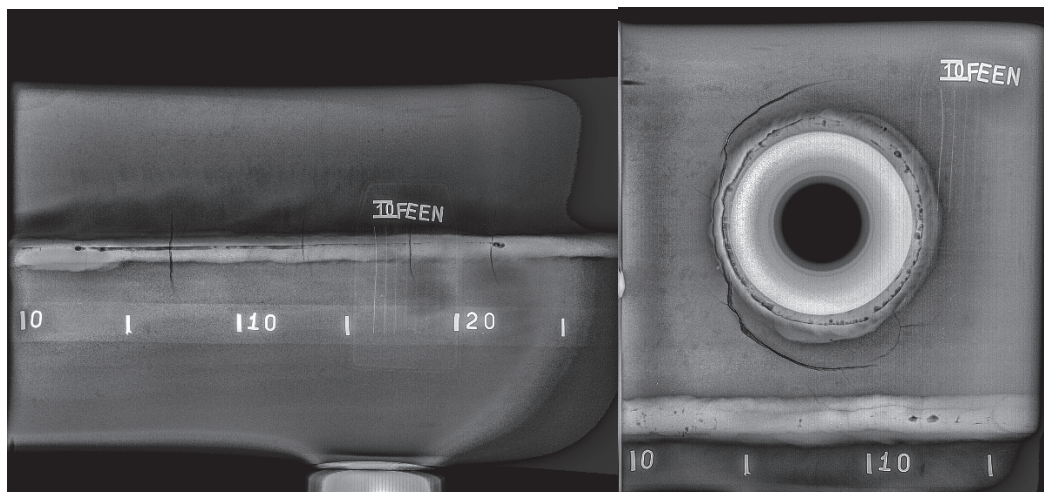


Рис.2. – Контроль за допомогою радіографічного методу (RT)

Аналіз підтвердив, що комплексний підхід є доцільним та підвищує достовірність, оскільки радіографічний контроль не фіксує поверхневі підрізи, а капілярний – внутрішні непровари.

Аналіз чинників дефектоутворення у зварних з'єднаннях



Результати комплексного неруйнівного контролю (VT, PT, RT) свідчать, що виявлені макродефекти, зокрема поперечні тріщини, мають технологічне походження. Їх наявність критично знижує несучу здатність конструкції та створює передумови для раптового крихкого руйнування.

Порушення регламентованого теплового режиму (температури попереднього підігріву та міжпрохідного інтервалу) призводить до зростання швидкості охолодження металу зварного шва та зони термічного впливу (ЗТВ). Для низьколегованих сталей це ініціює формування крихких гартованих структур – мартенситу та бейніту [4, 5]. Спираючись на дані [6], можна припустити, що термічний цикл зварювання ініціює в ЗТВ процеси рекристалізації та росту зерна, які негативно впливають на опір крихкому руйнуванню.

Високий рівень залишкових розтягувальних напружень зумовлений значною товщиною стінок та високою конструктивною жорсткістю вузла. Орієнтація тріщин перпендикулярно до осі шва підтверджує переважаючий вплив поздовжніх зварювальних напружень, значення яких наблизилися до границі міцності металу та створили умови для подальшого розвитку дефектів.

Оскільки тріщини набули макроскопічних розмірів після певного періоду експлуатації, їх генезис доцільно розглядати як результат синергії технологічних факторів та експлуатаційного навантаження. Ймовірно, на етапі зварювання дифузійний водень у поєднанні з крихкою структурою та залишковими напруженнями створив субмікроскопічні осередки руйнування [7]. У подальшому під дією робочого тиску відбулося поступове об'єднання цих осередків у магістральні поперечні тріщини.

Геометричні дефекти формування шва (непровари, підрізи, пористість) виконують роль інтенсивних концентраторів напружень. Особливо небезпечними є непровари, які не лише зменшують ефективний переріз, а й слугують «стартовими майданчиками» для розвитку тріщин за вказаним вище механізмом.

Висновки.

1. Комбіноване застосування методів неруйнівного контролю (VT, PT, RT) забезпечує більш повне виявлення як поверхневих, так і внутрішніх дефектів зварних з'єднань порівняно з використанням окремих методів.

2. У зварному з'єднанні обичайки з днищем виявлено характерні дефекти: підрізи, пористість, непровари та поперечні тріщини, що суттєво знижують міцність і надійність конструкції.

3. Основними причинами дефектоутворення можуть бути порушення теплового режиму зварювання, формування крихких структур у зоні термічного впливу, наявність дифузійного водню та високі залишкові напруження.





4. Встановлено, що виявлені тріщини мають змішаний характер похдження – технологічний із подальшим розвитком під дією експлуатаційних навантажень.

5. Отримані результати підтверджують доцільність застосування комплексного підходу до контролю якості зварних з'єднань посудин під тиском для запобігання аварійним руйнуванням.

ЛІТЕРАТУРА

1. Cherfaoui, M. (2012). Innovative techniques in non-destructive testing and industrial applications on pressure equipment. *Procedia Engineering*, 46, 266–278. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.472>

2. EN 10028-3. (2017). Flat products made of steels for pressure purposes – Part 3: Weldable fine grain steels, normalized. European Committee for Standardization.

3. Deepak, J. R., Bupesh Raja, V. K., Srikanth, D., Surendran, H., & Nickolas, M. M. (2021). Non-destructive testing (NDT) techniques for low carbon steel welded joints: A review and experimental study. *Materials Today: Proceedings*, 44(5), 3732–3737. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.578>

4. Щудро, А. Є. (2020). Особливості формування структури і властивостей зони термічного впливу зварних з'єднань із мікролегованих будівельних сталей (Дисертація канд. техн. наук). Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, Дніпро.

5. Jiang, C., Du, Y., Pan, W., & Zhang, X. (2021). Analysis and treatment of cracks in LPG spherical tank. *Journal of Physics: Conference Series*, 1820(1), 012065. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1820/1/012065>

6. Босий, М. В., & Боса, О. А. (2025). Дослідження впливу пластичної деформації на властивості та структуру сталі після термооброблення. *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*, (4), 21–28. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-21>

7. Świerczyńska, A., Fydrych, D., & Łabanowski, J. (2011). The effect of welding conditions on diffusible hydrogen content in deposited metal. *Solid State Phenomena*, 183, 193–200. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.183.193>

УДК 621.43:621.923:621.882

МОЖЛИВОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ТЕХНОЛОГІЇ ХОНІНГУВАННЯ ГІЛЬЗ ЦИЛІНДРІВ ДВЗ

В.Є. Олішевська¹, В.В. Кривда², Г.С. Олішевський³

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту, e-mail: olishevskav@nmu.one

²кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту, e-mail: krivdav@nmu.one

³кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, e-mail: Olishevskiy.H.S@nmu.one

^{1,2,3}Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна