

SECTION 11.

GENERAL MECHANICS AND MECHANICAL ENGINEERING

Коломоєць Ігор Вадимович 

PhD, доцент, доцент кафедри технології та устаткування зварювання
Дніпровський державний технічний університет, Україна

СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ УТВОРЕННЯ ХОЛОДНИХ ТРІЩИН ПРИ ЗВАРЮВАННІ ВИСОКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

Зварювання високолегованих та високоміцних сталей є критично важливим технологічним процесом у машинобудуванні, енергетиці, хімічному та нафтогазовому обладнанні. Надійність зварних з'єднань визначає безпечність експлуатації конструкцій.

Одним із найбільш небезпечних дефектів є **холодні тріщини**, які мають відстрочений характер виникнення, формуються після завершення кристалізації металу шва, часто проявляються через години або навіть добу після зварювання, можуть не виявлятися одразу при первинному контролі. Це створює серйозні ризики експлуатаційних відмов.

Холодні тріщини – це крихкі руйнування металу, які зазвичай виникають у зоні термічного впливу (ЗТВ), рідше – безпосередньо в металі шва, і здебільшого при температурах нижче 200 °С. В основі їхнього розвитку лежить воднево-індуковане руйнування, що робить цей процес особливо підступним для зварювальних конструкцій.

Класифікують холодні тріщини за кількома ознаками. По-перше, за локалізацією – вони можуть з'являтися в кореневій зоні, у ЗТВ або в самому металі шва. По-друге, за напрямком поширення – тріщини бувають поздовжні або поперечні. Нарешті, характер їхнього виникнення може бути міжкристалітним або транскристалітним.

Формування холодних тріщин визначається одночасною дією трьох критичних чинників. Перший – наявність дифузійного водню [1]. Джерелами водню виступають волога в покритті електродів, флюси, поверхневе забруднення металу та атмосферна волога. Водень, дифундуючи в зону максимальних напружень, знижує пластичність металу і сприяє крихкому руйнуванню.

Другий чинник – формування крихких структур у металевій матриці [2,3]. Інтенсивне охолодження під час зварювання призводить до утворення мартенситу, твердих бейнітних структур та інших кристалічних утворень із високою щільністю дефектів. Такі структури роблять метал більш ламким і сприйнятливим до розтріскування.

Третій фактор – високі залишкові напруження [4]. Термічні градієнти та жорсткість конструкції викликають локальні розтягувальні напруження, блокування усадки металу шва і концентрацію напружень у ЗТВ. Саме поєднання цих трьох чинників створює критичні умови для ініціювання холодної тріщини.

Важливу роль відіграють і технологічні параметри зварювання. Лінійна енергія, швидкість охолодження, час $t_8/5$, попередній підігрів, міжпрохідна температура, товщина металу та жорсткість вузла визначають ризик виникнення тріщин [5]. Особливо критичним є режим охолодження, який визначає кінетику фазових перетворень і рівень твердості у ЗТВ.

Сучасні підходи до прогнозування холодних тріщин показують, що чисто емпіричні методи потребують великої кількості експериментів, а аналітичні моделі без валідації часто неточні [6]. Найбільш ефективним вважається поєднання планування експерименту, математичного моделювання, статистичної обробки даних та експериментальної перевірки. Перспективним напрямом є створення моделей, що враховують одночасно теплові, дифузійні та механічні процеси.

Попри значний обсяг досліджень, залишаються відкритими питання щодо кількісної оцінки ймовірності утворення тріщин, визначення критичних меж швидкості охолодження, інтеграції металургійних і механічних критеріїв у єдину модель та прогнозування ризику з урахуванням реальної жорсткості конструкції.

Отже, проблема холодних тріщин у високолегованих сталях є багатофакторною і нелінійною. Найперспективнішим підходом сьогодні вважається створення комплексної експериментально-розрахункової моделі, яка дозволяє враховувати параметри теплового циклу, прогнозувати схильність до тріщиноутворення, оптимізувати режими зварювання та зменшувати потребу у надлишкових експериментах.

Список використаних джерел:

1. Hydrogen-Induced Cracking in CGHAZ of Welded X80 Steel under Tension Load / J. Gou et al. *Metals*. 2023. Vol. 13, no. 7. P. 1325. URL: <https://doi.org/10.3390/met13071325>
2. Effect of tempering heat treatment on the microstructure and impact toughness of a Ni–Cr–Mo–V steel weld metal / C. Han et al. *Materials Science and Engineering: A*. 2022. Vol. 850, no. 11. P. 14351. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.1435215>

3. Statistical Review of Microstructure-Property Correlation of Stainless Steel: Implication for Pre- and Post-Weld Treatment / M. Muhammed et al. *Processes*. 2020. Vol. 8, no. 7. P. 811. URL: <https://doi.org/10.3390/pr8070811>
4. Falodun O., Oke S., Bodunrin M. A comprehensive review of residual stresses in carbon steel welding: formation mechanisms, mitigation strategies, and advanced post-weld heat treatment techniques. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025. Vol. 136. P. 4107–4140.
5. Nemanič V. Hydrogen permeation barriers: Basic requirements, materials selection, deposition methods, and quality evaluation. *Nuclear Materials and Energy*. 2019. Vol. 19. P. 451–457.
6. Nondestructive Testing of Metal Cracks: Contemporary Methods and Emerging Challenges / X. Shen et al. *Crystals*. 2023. Vol. 14, no. 1. P. 54. URL: <https://doi.org/10.3390/cryst14010054>