

УДК 621.791

Валерій Лазарюк¹, к.т.н., доц.; Зіновій Грондзаль², к.т.н.; Андрій Блавіцький¹, Павло Сокіл¹

1 - Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

2 - ДНЗ «Тернопільський центр професійно-технічної освіти», Україна

ВПЛИВ ТЕРМІЧНОГО ЦИКЛУ НА ПОВЕДІНКУ ВОДНЮ У ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ СТАЛЕЙ

Анотація. Розглянуто вплив термічного циклу на поведінку водню у зварних з'єднаннях сталей з урахуванням фазових перетворень та системи водневих пасток. Показано, що у мартенситних сталях термічний маршрут після зварювання може впливати на перерозподіл і дегазацію дифузійного водню через зміну фазового стану металу. Для низьколегованих трубних сталей проаналізовано роль феритно-бейнітної структури у формуванні системи пасток та зниженні локалізації рухомого водню у зоні термічного впливу.

Ключові слова: водневе окрихчення, дифузійний водень, термічний цикл, фазові перетворення, зона термічного впливу.

Valeriy Lazaryuk, Ph.D, Assoc. Prof; Zinovii Hrondzal, Ph.D; Andrii Blavitskyi, Pavlo Sokil

INFLUENCE OF THE THERMAL CYCLE ON HYDROGEN BEHAVIOR IN WELDED STEEL JOINTS

Abstract. The influence of the thermal cycle on hydrogen behavior in welded steel joints was analyzed with consideration of phase transformations and hydrogen trapping mechanisms. It was shown that in martensitic steels the post-weld thermal route can affect the redistribution and degassing of diffusible hydrogen through changes in the phase state of the metal. For low-alloy pipeline steels, the role of the ferritic-bainitic microstructure in the formation of hydrogen trapping sites and in reducing the localization of mobile hydrogen within the heat-affected zone was considered.

Keywords: hydrogen embrittlement, diffusible hydrogen, thermal cycle, phase transformations, heat-affected zone.

Серед основних причин сповільненого руйнування зварних з'єднань є структурні неоднорідності, зварювальні напруження та дифузійний водень. Водень залишається одним із головних чинників, що визначають схильність зварних з'єднань сталей до сповільненого та крихкого руйнування. Відповідно до сучасних уявлень про механізм водневого тиску, рекомбінація атомарного водню у молекулярний у мікропорожнинах і дефектах структури може створювати локальний внутрішній тиск, який сприяє зародженню мікротріщин та зниженню опору крихкому руйнуванню, [1]. Зменшення вмісту дифузійного водню є не лише технологічним завданням дегазації зварних з'єднань, а й одним із напрямків підвищення опору крихкому руйнуванню.

Особливу роль у поведінці водню відіграють фазозалежні зміни його розчинності, рухливості та системи пасток у різних структурних складових сталі. У сталях водень перебуває не лише у твердому розчині, а й локалізується у так званих пастках — дефектах структури, межах зерен, інших недосконалостях структури. Залежно від енергії зв'язку розрізняють оборотні пастки, з яких водень може повторно дифундувати, та пастки з високою енергією зв'язку, здатні утримувати його протягом тривалого часу. Найбільш небезпечним є рухомий водень, який здатний локалізуватись у зонах концентрації напружень та поблизу дефектів структури, [2]. Тому стійкість

сталей до водневого руйнування визначається не лише загальним вмістом водню, а й характером системи пасток та фазовим станом металу.

У мартенситних сталях поведінка водню значною мірою визначається маршрутом фазових перетворень під час охолодження та термічної обробки після зварювання. Для покращення властивостей зварних з'єднань високохромистих сталей мартенситного класу та зменшення вмісту водню у шві може застосовуватись багатостадійне термічне оброблення з проміжним термічним відпочинком при 100–200 °С та подальшим відпуском з метою завершення мартенситного перетворення металу шва та ЗТВ, [3]. Перетворення аустеніту в мартенсит супроводжується зміною розчинності та рухливості водню, що призводить до його перерозподілу між фазами та структурними пастками. Зміна співвідношення між залишковим аустенітом, мартенситом і дефектами структури може впливати на рухливість водню та умови його локалізації. За відповідних режимів відпуску це сприяє частковому видаленню дифузійного водню зі структури. З сучасної точки зору такі процеси можуть розглядатися як фазово-індукований перерозподіл і дегазація водню. Таким чином, термічний маршрут після зварювання виступає не лише засобом керування мікроструктурою, а й способом впливу на рухливість водню, систему його пасток та схильність сталі до воднево-індукованого руйнування.

У низьколегованих трубних сталях механізми впливу термічного циклу на поведінку водню відрізняються від високохромистих мартенситних сталей через переважання феритно-перлітних або феритно-бейнітних структур, а також іншим характером мікроструктурної неоднорідності зони термічного впливу. У таких сталях зниження ризику водневого руйнування пов'язане насамперед із обмеженням локальних зон високої твердості, зменшенням рівня залишкових напружень та зниженням локалізації рухомого водню. При цьому формування дрібнодисперсної бейнітної складової може сприяти формуванню більш стабільної системи водневих пасток, порівняно з твердими мартенситними ділянками у зоні термічного впливу, [4]. Управління фазовим маршрутом в зварних з'єднаннях низьколегованих сталей може розглядатися як мікроструктурний підхід до зниження концентрації рухомого водню та ризику воднево-індукованого руйнування у зоні термічного впливу.

Перелік посилань:

1. Chen Y.-S., Huang C., Liu P.-Y., Yen H.-W., Niu R., Burr P., Moore K. L., Martínez-Pañeda E., Atrens A., Cairney J. M. Hydrogen trapping and embrittlement in metals – A review [Electronic resource] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2025. – Vol. 136. – P. 789–821.
2. Tien, I.K. Hydrogen transport by dislocations / I.K. Tien, A.W. Thompson, I.M. Bernstein, R.I. Richards // Met. Trans. – 1976. – V. 7. – № 6. – P. 821-829.
3. Левченко А. М., Гронзаль З. Я., Колесников А. М. Содержание диффузионного водорода в швах при механизированной сварке под флюсом высокохромистых сталей // Автомат, сварка.— 1986.— № 11.— С. 72—73.
4. Sun L., Li M., Fazeli F., Henein H. Effect of bainitic microstructure on hydrogen trapping in a low carbon micro-alloyed pipeline steel // International Journal of Hydrogen Energy. – 2025. – Vol. 136. – P. 702–712.