

УДК 620.1:621.643:662.769.2

Григорій Никифорчин, д.т.н., проф.; Ольга Звірко, д.т.н., проф., член-кореспондент НАН України; Олександр Цирульник, д.т.н., с.н.с.; Олег Венгрюк
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПІДХОДІВ МЕХАНІКИ РУЙНУВАННЯ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ВОДНЕВОЇ КРИХКОСТІ ЕКСПЛУАТОВАНИХ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ

Анотація. Експлуатована 38 років на магістральному газопроводі трубна сталь 17Г1С з високим рівнем пластичності не зазнала відчутного водневого окрихчення за показниками пластичності. Водночас за випробувань методом J -інтеграла виявлено істотну чутливість сталі до водневої крихкості, яка зростала зі зменшенням швидкості навантаження зразків.

Ключові слова: трубна сталь, транспортування водню, водневе окрихчення, метод J -інтеграла, швидкість навантаження.

Hryhoriy Nykyforchyn, Ph.D., Prof.; Olha Zvirko, Ph.D., Prof.; Oleksandr Tsyurulnyk, Ph.D.; Oleh Venhryniuk

FEATURES OF THE APPLICATION OF APPROACHES OF FRACTURE MECHANICS FOR ASSESSMENT OF THE HYDROGEN EMBRITTLEMENT OF EXPLOITED PIPELINE STEELS

Abstract. It was revealed that the low carbon pipeline steel after 38 years of operation on gas transit pipeline was not prone to hydrogen embrittlement at evaluating the plasticity indicators. However, a significant sensitivity of the steel to hydrogen embrittlement increasing with a decrease in the displacement rate of the specimens was observed using the J -integral method.

Keywords: pipeline steel, hydrogen transportation, hydrogen embrittlement, J -integral method, displacement rate.

Для оцінювання водневої крихкості конструкційних сталей розроблені різні способи [1], серед них ефективним вважається використання підходів механіки руйнування. Таку методологію досліджень застосовують і для трубних сталей, зокрема, з огляду встановлення деструктивного впливу наводнювання стінки труби з боку її зовнішньої поверхні на механічну поведінку матеріалу [2]. Останнім часом особливу увагу звертають на проблему водневої крихкості газопровідних сталей, пов'язану з транспортуванням існуючою мережею газопроводів водню чи суміші природного газу з воднем [3]. Це важливий аспект в енергетичній безпеці України, який супроводжується низкою викликів, пов'язаних з можливим порушенням цілісності труб через негативний вплив водню з боку їх внутрішньої поверхні [4]. До них належить підвищена наводнювальна здатність транспортованого середовища через інтенсифікацію як електрохімічного процесу виділення водню, так і дисоціації молекулярного водню [5, 6].

Використання існуючої газотранспортної мережі для транспортування водню зумовлює також необхідність врахування експлуатаційної деградації металу труб, яка посилює його чутливість до водневої крихкості [7, 8]. Це актуалізує оцінювання стану сталей з використанням підходів механіки руйнування, зокрема, в'язкості руйнування як механічного показника, особливо чутливого до наводнювання металу в околі вершини тріщини. Зазначимо також, що рівень в'язкості руйнування може слугувати і

розрахунковим параметром, що обмежує діаграми втомного руйнування з боку максимальних значень показника напружено-деформованого стану в околі вершини тріщини, характеризуючи механічну умову переходу від субкритичного до неконтрольованого її росту. З огляду на такий аналіз для оцінювання водневої крихкості експлуатованих трубних сталей у роботі використали підходи механіки руйнування.

Дослідили трубну сталь 17Г1С, аналог сталі API 5L X52, експлуатовану на магістральному газопроводі впродовж 38 років. Порівняли пластичність і в'язкість руйнування сталі за випроб зразків у повітрі без та після електролітичного наводнювання, яке реалізували в електроліті (водний розчин H_2SO_4 з $pH = 1$ з добавкою 10 г/л тіосечовини) за густини струму $0,05 \text{ mA/cm}^2$. Тривалість електролітичного наводнювання складала 50 год.

Вплив попереднього електролітичного наводнювання на пластичність сталі визначали за одновісного розтягу циліндричних зразків діаметром робочої частини 5 мм та довжиною 25 мм за типової для таких експериментів швидкості навантаження $3 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$. Експерименти не виявили значного прояву водневої крихкості: відносне звуження дещо знизилося, від 68% до 66%, а відносне видовження на рівні 25% взагалі не зазнало змін.

Враховуючи підвищену пластичність сталі, використали метод J -інтеграла [9] як один із методів нелінійної механіки руйнування для визначення в'язкості руйнування сталі. Навантажували триточковим згином балкові зразки товщиною 4 мм, в яких попередньо створювали втомні тріщини. Швидкість навантаження (прогину) ненаводнених зразків була типовою для таких експериментів 0,5 мм/хв, тоді як після наводнювання застосували різні швидкості: 0,5, 0,05 і 0,005 мм/хв. Випроб супроводжували реєстрацією діаграм зосереджена сила – прогин зразка, що склало основу для визначення рівня складової J -інтеграла в її нелінійній частині. Інший важливий показник, приріст тріщини в результаті активного статичного навантаження, визначали методом теплового відтінювання. За рівень в'язкості руйнування приймали значення J -інтеграла за приросту тріщини 0,2 мм ($J_{0,2}$). Результати експериментів наведені у таблиці.

Таблиця. В'язкість руйнування $J_{0,2}$ (Н/мм) експлуатованої сталі

Стан сталі	Швидкість навантаження, мм/хв		
	0,5	0,05	0,005
Без наводнювання	108	–	–
Після наводнювання	59	38	31

Окрихчувальний вплив водню трансформувал діаграми навантаження у бік зменшення ділянки відхилення від лінійності для заданого приросту тріщини, однак не такою мірою, щоби мати підстави для використання підходів лінійної механіки руйнування.

В таблиці наведено оцінки в'язкості руйнування експлуатованої сталі 17Г1С з урахуванням її наводнювання та різної швидкості навантаження зразків. Відзначимо, насамперед, істотне, майже вдвічі, зниження рівня $J_{0,2}$ навіть за порівняно високої швидкості навантаження 0,05 мм/хв, що вказує на високу чутливість використаного показника нелінійної механіки руйнування до окрихчувальної дії водню.

Зменшення швидкості навантаження посилює ефект водню і при мінімальній швидкості тріщиностійкість сталі падає втричі. Однак можна очікувати, що подальше зменшення швидкості зумовить втрату такого впливу, а то і протилежного ефекту зростання рівня тріщиностійкості. Справа в тому, що зменшення швидкості

навантаження супроводжується збільшенням тривалості експерименту, що означає покращення умов для десорбції водню з металу, тобто зниження в ньому його концентрації.

Таким чином, зменшуючи швидкість навантаження зразків при визначенні впливу попереднього наводнювання на тріщиностійкість сталей, необхідно враховувати перебіг двох протиборних процесів, з одного боку, покращені умови для транспорту водню в зону передруйнування в околі вершини тріщини, а з іншого – зниження загальної концентрації водню в металі через його десорбцію.

Висновки.

Експлуатована трубна сталь 17Г1С магістрального газопроводу з високим рівнем пластичності виявила незначну чутливість до водневої крихкості за зміною характеристик пластичності за її попереднього електролітичного наводнювання. Випробування на в'язкість руйнування методом J -інтеграла виявили її істотну чутливість до водневої крихкості, особливо за нижчої швидкості навантаження зразків.

Дослідження проведені завдяки грантовій підтримці проєкту № 2022.01/0099 Національним фондом досліджень України.

Перелік посилань

1. Hydrogen embrittlement as a conspicuous material challenge – comprehensive review and future directions / H. Yu, A. Díaz, X. Lu et al. // Chemical Reviews. – 2024. DOI: 10.1021/acs.chemrev.3c00624
2. Role of hydrogen in operational degradation of pipeline steel // H. Nykyforchyn, O. Tsyurulnyk, O. Zvirko, M. Hredil // Procedia Struct. Integr. – 2020. – 28. – P. 896–902.
3. Assessment of resistance to fatigue crack growth of natural gas line pipe steels carrying gas mixed with hydrogen / M. Dadfarnia, P. Sofronis, J Brouwer., S. Sosa // Int. J. Hydrogen Energy. – 2019. – 44(21). – P. 10808–10822.
4. Pipeline durability and integrity issues at hydrogen transport via natural gas distribution network / H. Nykyforchyn, L. Unigovskiy, O. Zvirko et al. // Procedia Struct. Integr. – 2021. – 33. – P. 646–651.
5. Методика оцінювання впливу газоподібного водню на корозію та наводнювання сталей / О. І. Звірко, М. І. Греділь, О. Т. Цирульник, О. І. Венгринюк, Г. М. Никифорчин // Фіз-хім. механіка матеріалів. – 2024. – № 5. – С. 10–17.
6. Effect of tensile stress on the hydrogen adsorption of X70 pipeline steel / Z. Xu, P. Zhang, B. Zhang et al. // Int. J. Hydrogen Energy. – 2022. – 47(50). – P. 21582–21595.
7. Assessment of Operational Degradation of Pipeline Steels / H. Nykyforchyn, O Zvirko., I. Dzioba et al. // Materials. – 2021. – 14, 12:3247.
8. Zvirko O. I. In-service degradation of structural steels (A Survey) // Mater. Sci. – 2022. – 57(3). – P. 319–330.
9. Standard Test Method for J-Integral Characterization of Fracture Toughness. ASTM. E 813 / In: Annual Book of ASTM Standards. – Vol. 03.01. – P. 713–727.