

ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ВПЛИВУ ДЕГРАДАЦІЇ ТРУБНОЇ СТАЛІ НА НАДІЙНІСТЬ КОРОДОВАНИХ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ ГАЗОВОДНЕВИХ СУМІШЕЙ

О.С. Міленін, О.А. Великоіваненко, Г.П. Розинка, Н.І. Півторак

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: asmilenin@ukr.net

Одним із перспективних шляхів використання вітчизняної газотранспортної системи в умовах стрімкого переходу до економіки сталого розвитку є транспортування нею сумішей природного газу та зеленого водню. Для безпечного використання існуючих магістральних газопроводів при транспортуванні газоводневих сумішей різного складу необхідно враховувати негативний вплив водню на механічні властивості металу труб, зокрема при оцінці їх технічного стану за результатами дефектоскопії. У рамках даної роботи досліджено закономірності безпеки експлуатації трубопроводів з виявленими дефектами локальної корозійної втрати металу. Для цього розроблено чисельну методологію оцінки крихкої міцності на основі скінченно-елементного моделювання напруженого стану та критеріїв крихко-в'язкого руйнування. Показано, що в умовах статичного навантаження деградація опірності крихкому руйнуванню металу трубопроводу з виявленим дефектом локальної втрати металу відносно невелика та може бути компенсована зміною експлуатаційного навантаження. В умовах циклічного навантаження внутрішнім тиском продемонстровано закономірності зниження несучої здатності кородованого трубопроводу в залежності від фактичної опірності крихкому руйнуванню трубної сталі. Бібліогр. 18, рис. 6.

Ключові слова: газоводнева суміш, магістральний газопровід, локальна корозійна втрата металу, воднева деградація, технічний стан, крихке руйнування, циклічне навантаження

Вступ. Одним з найбільш інтенсивно зростаючих секторів сучасної енергетики є виробництво та застосування зеленого водню як екологічної альтернативи викопним вуглеводням. Зокрема це відображено у Водневій стратегії Європейського Союзу, а також в аналогічних документах інших країн, де планується максимальне впровадження водню для промислових, транспортних чи побутових потреб, що є складовою трансформації світової економіки згідно з принципами сталого розвитку [1–3]. Тут важливо підкреслити, що водень виступає не як власне паливо, але як енергоносіє від відновлювальних джерел енергії (сонячних, вітрових чи гідроелектростанцій, геотермальних джерел тощо) або як сировина (для хімічної промисловості). Тому однією з ключових задач при реалізації подібних підходів для зеленої енергетики є транспортування газоподібного водню. Побудова нової системи трубопроводів для цих потреб є масштабним і коштовним інфраструктурним проектом. Тому раціональним є використання існуючих газотранспортних систем (ГТС). Проте відомо про негативний вплив дифузійного водню на експлуатаційні властивості конструкцій з трубних сталей, що викликано водневою деградацією металу [4, 5]. Тому безпосереднє використання магістральних і розподільчих трубопроводів для транспортування чистого водню об'єктивно ускладнене.

В якості одного з практично можливих шляхів використання існуючої газотранспортної мережі для потреб водневої енергетики розглядається та поступово впроваджується транспортування сумішей природного газу та зеленого водню [6]. У залежності від складу суміші, тобто від парціального тиску водню, передбачається різний рівень необхідних додаткових технологічних заходів для підтримки роботоздатності окремих компонентів ГТС. Перш за все, це стосується вибору припустимих режимів експлуатації, порядку планування заходів з контролю технічного стану та експертної оцінки надійності. Однією з типових задач є оцінка припустимості експлуатаційних аномалій геометрії трубопроводу, що виявляються засобами неруйнівного контролю в процесі періодичної дефектоскопії. При суттєвому наводненні металу дефектного трубопроводу застосування стандартизованих методик оцінки статичної міцності може бути обмеженим, зокрема, в результаті зміни превалюючих механізмів мікроскопічного та макроскопічного руйнування, які визначають умови граничного стану конструкції. Так, при аналізі припустимості тріщиноподібних дефектів трубопроводів (чи аномалій, що формально схематизуються як тріщини, наприклад неметалеві включення, риси, канавки, непровари зварних швів тощо) граничний стан конструкцій під

дією експлуатаційного навантаження визначається опірністю матеріалу крихкому руйнуванню [7]. Тому при оцінці технічного стану трубопроводів з тріщиноподібними аномаліями необхідно враховувати зміну значень в'язкості руйнування матеріалу K_{lc} і характеристики міцності, що входять до відповідних критеріїв граничного стану. У разі аналізу припустимості тривимірних несучильностей матеріалу, серед яких найпоширенішими є локальні корозійні втрати металу, граничний стан трубопроводу прийнято визначати за критеріями в'язкого руйнування [8]. Але при суттєвому окрихчуванні металу механізми зародження та розвитку руйнування металу в області аномалії може змінитися на крихко-в'язкий чи крихкий. Тому в залежності від складу транспортованої газоподовної суміші (та відповідної насиченості металу трубопроводу дифузійним воднем) стандартні критерії граничного стану можуть бути обмежено застосовними.

Метою даної роботи є визначення закономірностей впливу ступеня водневої деградації трубної сталі (зміни в'язкості руйнування та опірності втомному руйнуванню) на граничний стан магістрального газопроводу з виявленою геометричною аномалією локальної поверхневої корозійної втрати металу за крихко-в'язкого механізму руйнування. Для цього запропоновано чисельну методику оцінки напружено-деформованого та граничного станів кородованих трубопроводів на основі методу постульованих дефектів.

Як вже зазначалося вище, одним із найпоширеніших видів експлуатаційного пошкодження підземних магістральних трубопроводів є локальні корозійні втрати металу в області порушення захисної ізоляції. Подібні геометричні аномалії прийнято схематизувати як напівеліптичні поверхневі стоншення стінки труби (рис. 1). Наявність геометричної аномалії зумовлює локальну неоднорідність напружень у перерізі труби під дією внутрішнього тиску та відповідну неоднорідність схильності матеріалу до зародження руйнування. Згідно з загальними уяв-

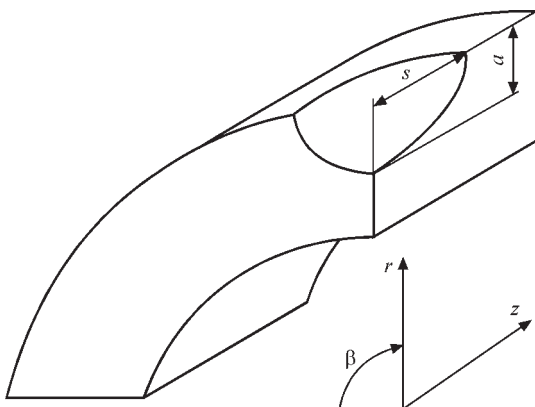


Рис. 1. Схема трубопроводу з поверхневим дефектом корозійного стоншення стінки

леннями, граничний стан посудин тиску з тривимірними дефектами несучильності металу визначається в'язким механізмом руйнування, який полягає в зародженні та розвитку мікроскопічної пористості при пластичному деформуванні матеріалу під дією зовнішнього навантаження [9]. Проте в разі значного наводнення матеріалу трубопроводу при транспортуванні газоподовних сумішей суттєвішим є крихкий механізм руйнування, особливо при наявності зародків тріщин у металі.

Для визначення закономірностей впливу ступеня водневої деградації трубної сталі на крихку міцність труби в неоднорідному полі механічних напружень раціональним є використання методів чисельного моделювання поряд із відповідними критеріями граничного стану. Так, у рамках цієї роботи чисельний аналіз проводився на основі скінченно-елементної моделі пружно-пластичного суцільного середовища шляхом постановки та розв'язання відповідної крайової задачі за допомогою програмного комплексу WeldPrediction [10]. Приріст компонентів тензора деформації розглядався як сума приростів $d\epsilon_{ij}^e$ пружних і пластичних $d\epsilon_{ij}^p$ складових, $i, j = r, \beta, z$ (рис. 1):

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p. \quad (1)$$

Подальший аналіз напружено-деформованого стану дефектного трубопроводу при збільшенні внутрішнього тиску проводився шляхом простеження накопичення та перерозподілу деформації при поступовому збільшенні навантаження. Під час кожного кроку простеження зв'язок між компонентами тензорів напружень (σ_{ij}) і деформацій (ϵ_{ij}) визначався за допомогою узагальненого закону Гука та асоційованого закону пластичної течії [11]:

$$\Delta\epsilon_{ij} = \Psi(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_m) + \delta_{ij}K\sigma_m - \frac{1}{2G}(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_m)^* + (K\sigma_m)^*, \quad (2)$$

де δ_{ij} – символ Кронекера, $K = (1-2\nu)/E$, $G = 0,5E/(1+\nu)$; E – модуль Юнга; ν – коефіцієнт Пуассона; індекс «*» відносить змінну до попереднього кроку простежування за кроком навантаження; Ψ – функція стану металу, яка визначається ітераційно, виходячи з поточної форми поверхні течучості в залежності від інтенсивності напружень σ_i і границі течучості σ_T [11]:

$$\Psi = \frac{1}{2G}, \text{ якщо } \sigma_i < \sigma_T; \\ \Psi > \frac{1}{2G}, \text{ якщо } \sigma_i = \sigma_T; \quad (3)$$

стан $\sigma_i > \sigma_T$ неприпустимий.

На кожному кроці простежування умови (3) реалізуються, враховуючи історію пластичного деформування, зокрема деформаційне зміцнення.

Одночасно під час кожної ітерації на Ψ розраховується поле напружень σ_{ij} :

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{\Psi} \left(\Delta \varepsilon_{ij} + \delta_{ij} \frac{\Psi - K}{K} \Delta \varepsilon \right) + J_{ij}, \quad (4)$$

$$\text{де } J_{ij} = \frac{1}{\Psi} \left[(b_{ij} - \delta_{ij} b) + \delta_{ij} K \sigma^* \right], \Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_{ii} / 3, b = b_{ii} / 3.$$

Компоненти тензора напружень задовольняють рівнянню статки для внутрішніх скінченних елементів (СЕ) і граничним умовам для поверхневих СЕ. Для формування системи лінійних алгебраїчних рівнянь для вектора приростів переміщень у вузлах СЕ на кожному кроці простежування та ітерацій по Ψ мінімізується наступний функціонал [11]:

$$L_I = -\frac{1}{2} \sum_V (\sigma_{ij} + J_{ij}) \Delta \varepsilon_{ij} V_{m,n,r} + \sum_{\Theta} F_i \Delta U_i \Delta S_p^{m,n,r}, \quad (5)$$

де $\sum_V$ – оператор суми за внутрішніми СЕ; $\sum_{\Theta}$ – оператор суми за СЕ по поверхні S_p , на якій задано компоненти силового вектора F_i . Детальний опис рівнянь (1)–(5) та програмну реалізацію їх розв’язання наведено в [12].

Оцінка фактичної надійності трубопроводу в умовах різного ступеня водневого окрихчування матеріалу за неоднорідного поля напружень, викликаного внутрішнім тиском і локальною геометричною аномалією, проводилася методом постульованих дефектів. Цей метод передбачає припущення про наявність невеликих тріщиноподібних дефектів і подальшу оцінку їх допустимості. Для оцінки крихкої міцності кородованих трубопроводів із урахуванням водневої деградації металу для кожного постульованого дефекту коефіцієнт запасу міцності n розраховується на основі відповідного критерію граничного стану для тіла з тріщиною. Зазвичай використовуваним критерієм є процедура R6 [13], яка базується на двопараметричній діаграмі крихко-в’язкого руйнування (рис. 2) і може бути математично описана як:

$$nK_r(L_r) = \begin{cases} \left[1 - 0,14(nL_r)^2 \right] \left\{ 0,3 + 0,7 \exp \left[-0,65(nL_r)^6 \right] \right\}, & \text{при } nL_r \leq L_{r\max} \\ 0, & \text{при } nL_r > L_{r\max}. \end{cases}, \quad (6)$$

де $K_r = K_1/K_{lc}$, $L_r = \sigma_{ref}/\sigma_T$; K_1 – коефіцієнт інтенсивності напружень; K_{lc} – в’язкість руйнування; σ_{ref} – довідкові напруження. Розрахунок K_1 і σ_{ref} виконується за алгоритмами, наведеними в [14].

Оцінка коефіцієнта запасу міцності n базувалася на двопараметричній діаграмі (рис. 2) та складалася з розрахунку співвідношення довжин відрізків від початку координат до фактичної точки (K_r , L_r) та її продовження до перетину граничної кривої.

Використання розробленого чисельного підходу при оцінці впливу експлуатаційного наванта-

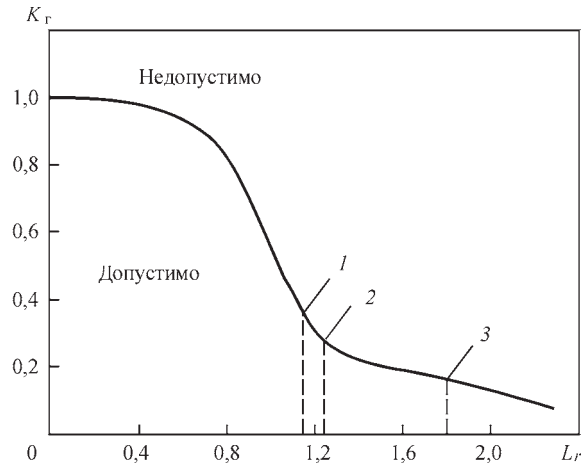


Рис. 2. Двопараметрична діаграма крихко-в’язкого руйнування конструкції з тріщиною [13]: 1 – 1,15 (типові низьколеговані сталі та зварні з’єднання); 2 – 1,25 (типові низьковуглецеві сталі та аустенітні зварні з’єднання); 3 – 1,8 (типові аустенітні сталі)

ження на кородований елемент магістрального газопроводу дозволяє не тільки оцінювати статичну міцність конструкції за різного ступеня водневої деградації, але й враховувати вплив циклічного навантаження внутрішнім тиском у межах припустимих проектних значень. Для цього розраховувалася швидкість втомного зростання постульованих тріщин згідно з законом Паріса. Якщо навантаження характеризується асиметрією циклу з коефіцієнтом R , то закон збільшення розмірів тріщини в залежності від кількості циклів навантаження N може бути сформульований як [15]:

$$\frac{dc}{dN} = \frac{C \cdot (\Delta K_I)^m}{(1-R) - \frac{\Delta K_I}{K_{lc}}}, \quad (7)$$

де C , m – коефіцієнти Паріса.

Таким чином, втомне збільшення постульованих тріщин в умовах циклічного навантаження трубопроводу з локальним корозійним стоншенням стінки та певним ступенем водневої деградації властивостей металу може бути кількісно оцінено зміною коефіцієнта запасу крихкої міцності n .

Як приклад використання запропонованого підходу в цій роботі розглянуто типову прямолінійну ділянку трубопроводу діаметром $D = 1420$ мм і товщиною стінки $t = 20$ мм, матеріал труби – трубна сталь X80. Було проаналізовано два види експлуатаційного навантаження, а саме: статичний внутрішній тиск газоводневої суміші (максимальне значення $P = 7,5$ МПа) і циклічну зміну внутрішнього тиску в діапазоні 5,5...7,5 МПа, кількістю до 1000 циклів. Фактичні механічні властивості металу трубопроводу залежать від концентрації водню у транспортованій суміші та відповідного рівня деградації. Згідно з наявними даними [16], водень має найсуттєвіший негатив-

ний вплив на стійкість трубної сталі до крихкого руйнування (тобто зміна K_{lc}) і втомного руйнування (яка кількісно описується змінами коефіцієнтів Паріса C і m). При цьому за об'ємної концентрації водню в суміші до 50 % зміни величини границь міцності та текучості не спостерігається. Для трубних сталей при концентраціях водню в транспортній суміші 5...20 % коефіцієнти Паріса складають приблизно $C = 2,98 \cdot 10^7$, $m = 2,580$ [17].

Як зазначалося вище, розмір постульованої тріщини є важливим параметром кількісного розрахунку труб на статичну чи втомну міцність. Для розглянутого випадку попередній розрахунок показав, що при розмірі під поверхневої еліптичної тріщини $2,5 \times 0,4$ мм запас міцності труби становить приблизно 1,92. Це консервативно відповідає проектним вимогам для трубопроводу (1,94). Для точного врахування тривимірного напружено-деформованого стану при розрахунку крихкої міцності розглядалися тріщини різної орієнтації відносно осі труби (поздовжні, окружні) і обирався мінімальний запас міцності n в перерізі конструкції.

Розроблений чисельний підхід для визначення запасу крихкої міцності продемонстровано на прикладі характерного дефекту локального корозійного стоншення стінки напівеліптичної форми ($2s = 200$ мм, $a = 4...12$ мм). Проведено порівняння зі стандартизованими алгоритмами оцінки припустимості таких аномалій згідно з вітчизняним стандартом ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008 [18]. Цей стандарт базується на аналізі залишкового коефіцієнта запасу міцності трубопроводів із локальною корозійною втратою металу, що робить доцільним порівняння із запропонованими розрахунками. Як показано на рис. 3, кореляція між розробленою методикою та нормативними вимогами є задовільною.

Результати чисельного аналізу впливу ступеня корозійного пошкодження (глибини локаль-

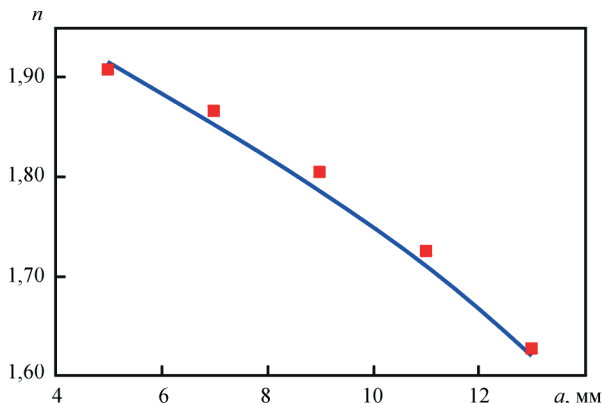


Рис. 3. Порівняння залежності коефіцієнта запасу крихкої міцності n трубопроводу (1420×20 мм) з дефектом локального стоншення стінки ($2s = 100$ мм) від глибини дефекту a за розрахунком методом постульованих тріщин і за [18]: ■ — згідно з ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008

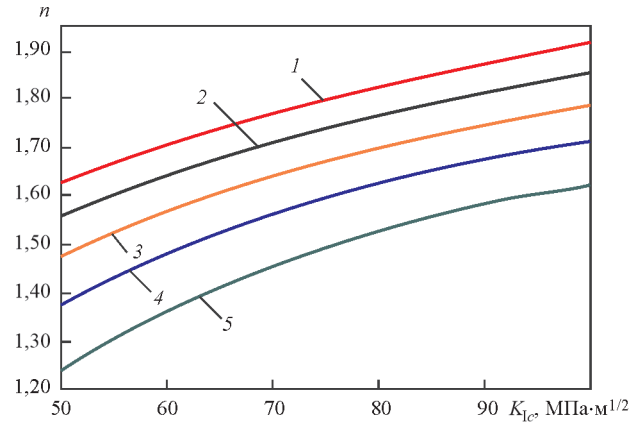


Рис. 4. Залежності крихкої міцності трубопроводу n (1420×20 мм) з локальним стоншенням стінки ($2s = 200$ мм) при тиску $P = 7,5$ МПа від величини в'язкості руйнування K_{Ic} матеріалу та глибини дефекту a , мм: 1 – 4; 2 – 6; 3 – 8; 4 – 10; 5 – 12

ного стоншення стінки) трубопроводу на його надійність за статичного навантаження внутрішнім тиском і при різних значеннях K_{Ic} наведено на рис. 4. З цих даних можна зробити висновок про чутливість запасу крихкої міцності кородованого трубопроводу до фактичної в'язкості руйнування матеріалу за різної глибини дефекту корозійної втрати металу, що необхідно враховувати при аналізі його роботоздатності.

На рис. 5 наведено розрахункові залежності величини опірності крихкому руйнуванню від глибини локального стоншення стінки a для різних значень робочого тиску P у трубопроводі, проектний припустимий запас міцності $n = 1,617$. Ці результати демонструють значний запас міцності кородованих газопроводів при транспортуванні газоподобних сумішей за статичного навантаження: в типових діапазонах робочого тиску 5,5...7,5 МПа суттєве зниження в'язкості руйнування залишається прийнятним. Таким чином, надійність і безпеку експлуатації кородованого магістрального газопроводу з певним рівнем водневої деградації властивостей матеріалу можна гаранту-

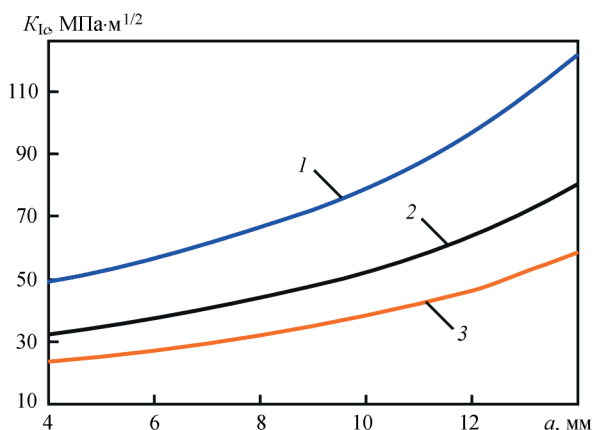


Рис. 5. Залежності гранично допустимої деградації матеріалу трубопроводу (зміни K_{Ic}) від глибини виявленого локального стоншення стінки a і при різних робочих тисках P , МПа: 1 – 7,5; 2 – 6,5; 3 – 5,5

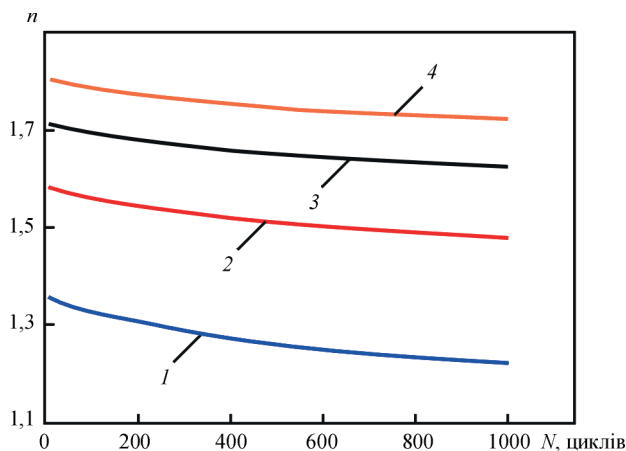


Рис. 6. Залежності коефіцієнта запасу крихкої міцності трубопроводу n (1420×20 мм) з виявленим дефектом локального стоншення стінки ($2s \times a = 200 \times 10$ мм) від кількості циклів зміни внутрішнього тиску з 5,5 до 7,5 МПа та величини в'язкості руйнування K_{Ic} металу труби, МПа·м^{1/2}: 1 – 50; 2 – 75; 3 – 100; 4 – 125

вати шляхом внесення відповідних коригувань до експлуатаційних режимів.

Для випадку циклічного навантаження змінним внутрішнім тиском (у межах проектного діапазону 5,5...7,5 МПа) необхідно додатково враховувати втомне збільшення розміру постульованих тріщин. Як показано на рис. 6, у межах 1000 циклів навантаження зниження мінімального коефіцієнта запасу міцності в перерізі дефектного трубопроводу ($2s \times a = 200 \times 10$ мм) не перевищує 0,2 у залежності від величини в'язкості руйнування K_{Ic} . Тому, в разі якщо конкретний трубопровід має надлишкову проектну міцність, вплив втомного механізму накопичення пошкодження можна не враховувати при оцінці припустимості локальних втрат металу корозійного типу.

Висновки

1. Для прогнозування надійності елементів магістральних трубопроводів з геометричними аномаліями локального корозійного стоншення стінки напівеліптичної форми з урахуванням водневої деградації механічних властивостей матеріалу запропоновано чисельну методологію визначення запасу крихкої міцності. В основу цієї методології покладено скінченно-елементний аналіз напружено-деформованого стану трубопроводу та розрахунок коефіцієнта запасу крихкої міцності, який базується на методі постульованих тріщин і двопараметричному критерію крихко-в'язкого руйнування. Проведено порівняння зі стандартизованими алгоритмами оцінки припустимості таких аномалій згідно з вітчизняним стандартом ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008, показано задовільну кореляцію між розробленою методикою та нормативними вимогами.

2. Продemonстровано значний запас міцності кородованих газопроводів при транспортуванні газоводневих сумішей за статичного навантаження: у типових діапазонах робочого тиску 5,5...7,5 МПа зниження в'язкості руйнування K_{Ic} залишається прийнятним. Таким чином, надійність і безпеку експлуатації кородованого магістрального газопроводу з певним рівнем водневої деградації властивостей матеріалу можна гарантувати шляхом внесення відповідних коригувань до експлуатаційних режимів.

3. Для випадку циклічного навантаження змінним внутрішнім тиском у межах експлуатаційного діапазону 5,5...7,5 МПа додатково враховано втомне збільшення розміру постульованих тріщин за законом Паріса. Показано, що в межах 1000 циклів навантаження зниження мінімального коефіцієнта запасу міцності в перерізі дефектного трубопроводу (розмір дефекту стоншення 200×10 мм) не перевищує 0,2 у залежності від фактичної величини в'язкості руйнування K_{Ic} . Тому, в разі якщо конкретний трубопровід має надлишкову проектну міцність, вплив втомного механізму накопичення пошкодження можна не враховувати при оцінці припустимості локальних втрат металу корозійного типу.

Список літератури/References

- Aravindan, M., Praveen Kuma, G. (2023) Hydrogen towards sustainable transition: A review of production, economic, environmental impact and scaling factors. *Results in Engineering*, **20**, 101456. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101456>
- Agrawal, D., Mahajan, N., Singh, S.A., Sreedhar, I. (2024) Green hydrogen production pathways for sustainable future with net zero emissions. *Fuel*, **359**, 130131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130131>
- Falcone, P.M., Hiete, M., Sapio, A. (2021) Hydrogen economy and sustainable development goals: Review and policy insights. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, **31**, 100506. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2021.100506>
- Zvirko, O. (2022) Anisotropy of hydrogen embrittlement in ferrite-pearlitic steel considering operational degradation. *Procedia Structural Integrity*, **42**, 522–528. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.12.066>
- Huakun, W., Tongyao, W., Sheng, Y. et al. (2024) Ductile burst behavior of high pressure X100 steel pipe considering hydrogen damage. *Int. J. of Hydrogen Energy*, **58**, 362–379. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.106>
- Cakir Erdener, B., Sergi, B., Guerra, O.J. et al. (2023) A review of technical and regulatory limits for hydrogen blending in natural gas pipelines. *Int. J. of Hydrogen Energy*, **48**, 5595–5617. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.254>
- Makhnenko, V.I., Pochinok, V.E. (2006) *Strength Calculation of Welded Joints with Crack-Like Imperfections*. E.O. Paton Electric Welding Institute, NASU.
- Zengtao, C., Butcher, C. (2013) *Micromechanics Modelling of Ductile Fracture*. Springer Science+Business Media Dordrecht.
- Миленин А.С., Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И. (2016) Моделирование процессов зарождения и развития докритической поврежденности металла сварных трубопроводных элементов при малоцикловом нагружении. *Техн. диагностика и неразруш. контроль*, **4**, 14–20.

Velikoivanenko, E.A., Milenin, A.S., Rozyinka, G.F., Pivtorak, N.I. (2016) Simulation of processes of initiation and propagation of subcritical damage of metal in welded pipeline elements at low-cycle loading. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 14–20 [in Russian].

10. Velikoivanenko, E., Milenin, A., Popov, A. et al. (2019) Methods of numerical forecasting of the working performance of welded structures on computers of hybrid architecture. *Cybernetics and Systems Analysis*, **55**, **1**, 117–127. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00117-8>

11. Махненко В.И. (2006) *Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций*. Киев, Наукова думка.
Makhnenko, V.I. (2006) *Safe service life of welded joints and assemblies of modern structures*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].

12. Makhnenko, V.I., Milenin, A.S., Semyonov, A.P. (2007) Mathematical modelling of thermal-deformation processes in braze-welding of butt joints of the titanium-aluminium type. *The Paton Welding J.*, **11**, 5–9.

13. (2013) BS 7910:2013. *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*. BSI Standards Publication.

14. (2016) API 579-1/ASME FFS-1. *Fitness-For-Service 2016*. Washington, American Petroleum Institute, American Society of Mechanical Engineers.

15. Zhao, X.-L., Packer, J.A. (2000) Recommended fatigue design procedure for welded hollow section joints. *IIW doc. XIII-1772-99/XV-1021-99*. Abington Publ., Abington Cambridge UK.

16. Сміян О.Д. (2018) *Водень і руйнування металу об'єктів тривалої експлуатації*. Київ, Наукова думка.
Smiyan, O.D. (2018) *Hydrogen and metal fracture of long-term operation objects*. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].

17. Meng, B., Gu, C.H., Zhang, L. et al. (2017) Hydrogen effects on X80 pipeline steel in high-pressure natural gas/hydrogen mixtures. *Int. J. of Hydrogen Energy*, **42**, **11**, 7404–7412. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.145>

18. (2008) ДСТУ Н Б В.2.3-21:2008. *Настановою. Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами*. Київ, Міністерство України.
(2008) DSTU N B.2.3-21:2008. *Directive. Determination of residual strength of main pipelines with defects*. Kyiv, Minregionbud Ukrainy [in Ukrainian].

NUMERICAL ANALYSIS OF THE REGULARITIES OF THE INFUENCE OF PIPE STEEL DEGRADATION ON THE RELIABILITY OF CORRODED MAIN GAS PIPELINES USED FOR TRANSPORTATION OF GAS-HYDROGEN MIXTURES

O.S. Milenin, O.A. Velykoivanenko, G.P. Rozyinka, N.I. Pivtorak

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv. E-mail: asmilenin@ukr.net

Transportation of mixtures of natural gas and green hydrogen is one of the promising ways to use the local gas-transportation system under the conditions of a rapid transition to a sustainable economy. For safe operation of the available main gas pipelines at transportation of gas-hydrogen mixtures of different compositions, it is necessary to take into account the negative influence of hydrogen on the mechanical properties of pipe metal, in particular at evaluation of their technical condition by the results of flaw detection. In this work, the principles of safe operation of pipelines with detected defects of local corrosion loss of metal were studied. For this purpose a numerical procedure was developed for assessment of brittle strength based on finite-element modeling of the stressed state and brittle-ductile fracture criteria. It is shown that under the conditions of static loading degradation of brittle fracture resistance of pipeline metal with the detected defect of local metal loss is relatively small, and it can be compensated by a change in service load. Under the conditions of cyclic loading by internal pressure the regularities of lowering of the load-carrying capacity of a corroded pipeline were demonstrated, depending on the actual brittle fracture resistance of the pipe steel. 18 Ref., 6 Fig.

Keywords: gas-hydrogen mixtures, main pipeline, local metal loss due to corrosion, hydrogen degradation, technical condition, brittle fracture, cyclic loading

Отримано 09.02.2024
Отримано у переглянутому вигляді 01.03.2024
Прийнято 22.03.2024

ПЕРЕДПЛАТА 2024

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.			
	місяць	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 6 випусків на рік. ISSN 0005-111X. Передплатний індекс 70031.	–	–	900	1800
«Сучасна електрометалургія», видається з 1985 р., 4 випуски на рік. ISSN 2415-8445. Передплатний індекс 70693.	–	300	600	1200
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 0235-3474. Передплатний індекс 74475.	–	300	600	1200
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X. Передплатний індекс 21971.	600	1800	3600	7200

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.
** Журнал «The Paton Welding Journal» містить статті, отримані від авторів з усього світу і вибірково переклади на англійську мову статей з журналів «Автоматичне зварювання», «Сучасна електрометалургія», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль».

Передплату на журнали можна оформити по каталогам передплатних агенцій «УКРПОШТА», «Прес Центр» та у видавництві. Передплата через видавництво з любого місяця на любой термін, в т.ч. на попередні періоди та окремі статті, починаючи з першого року видання.
Можлива також передплата на електронні версії журналів.