

О. І. Венгринюк, О. І. Звірко

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України

**ОБҐРУНТУВАННЯ КРИТЕРІЮ ГРАНИЧНОГО СТАНУ СТАЛЕЙ ГАЗОПРОВІДІВ
ЗА ЇХ ПЕРЕПРОФІЛЮВАННЯ ДЛЯ ВОДНЮ**

Тривала експлуатація магістральних трубопроводів спричиняє істотне зниження вихідних механічних характеристик. Проаналізовано вплив експлуатаційних умов наводнювання сталей газопроводів на їх деградацію за опором крихкому руйнуванню. Обґрунтовано критерій досягнення граничного стану сталей за тріщиностійкістю залежно від тиску газу в трубі та наявності тріщиноподібних дефектів. Отримані результати можна використати для оцінювання роботоздатності сталей магістральних газопроводів в умовах транспортування водню.

Ключові слова: сталь, трубопровід, механічні властивості, водень, деградація, концентрація водню, тріщиностійкість, J -інтеграл, напівеліптична тріщина, роботоздатність.

O. I. Venhryniuk, O. I. Zvirko

**SUBSTITUTION OF THE LIMIT STATE CRITERIUM OF GAS PIPELINE STEEL DURING
THEIR REPROFILING FOR HYDROGEN**

Long-term operation of natural gas transmission pipelines causes a significant decrease in the initial mechanical characteristics of pipeline steels. The influence of operating conditions of hydrogen uptake by natural gas pipeline steels on their degradation in terms of resistance to brittle fracture is analyzed. The criterion for achieving a limit state of steels in terms of crack growth resistance considering the operational degradation, hydrogen charging conditions, gas pressure in the pipe and the presence of crack-like defects is substantiated. The obtained results can be used for assessment the serviceability of gas transit pipeline steels reprofiling for gaseous hydrogen transportation.

Key words: steel, pipeline, mechanical properties, hydrogen, degradation, hydrogen concentration, crack growth resistance, J -integral, semi-elliptical crack, serviceability.

Постановка проблеми. Магістральні трубопроводи відносять до особливо відповідальних, оскільки порушення їх цілісності спричиняє значні негативні наслідки. Актуальним завданням декарбонізації енергетики є перепрофілювання газової інфраструктури для транспортування водню [1, 2]. Для його вирішення необхідно врахувати низку чинників, визначальних для безпечної та надійної експлуатації трубопроводів. Це, зокрема, загальновідомий негативний вплив водню на механічні властивості сталей [1–5], а також деградація тривало експлуатованих сталей трубопроводів [2, 6–8]. Оскільки магістральні газопроводи спроектовані для транспортування природного газу, то взаємодія водню з трубними сталями у поєднанні з їх експлуатаційною деградацією вимагає розроблення нових критеріїв оцінювання їх роботоздатності за дії водню.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження стану тривало експлуатованих магістральних газопроводів свідчать про істотне погіршення вихідних фізико-механічних характеристик сталей, якщо їх деградація відбувається за сумісної дії механічних навантажень і абсорбованого металом водню [2, 6–8]. Вона проявляється окрихченням сталей, розвитком у них пошкодженості та зниженням їх опору крихкому руйнуванню. Водночас, може зростати схильність сталей до водневого окрихчення [8, 9]. Особливо небезпечним результатом пошкодженості є утворення та розвиток тріщин. Загалом, уже на стадії проектування таких великих конструкцій розглядають ймовірність наявності в них невиявлених мікротріщин [10], що не можливо уникнути навіть при застосуванні сучасних діагностичних систем. Експлуатаційна деградація посилює розвиток наявних та зародження нових мікротріщин. Тому тріщиностійкість є важливою характеристикою металу, яка визначає роботоздатність трубопроводів [1].

В умовах транспортування водню він буде взаємодіяти з трубними сталями, внаслідок чого відбуватиметься воднева деградація сталей, насамперед через їх водневе окрихчення [1–3]. Це спричиняє погіршення механічних характеристик сталей [1–5, 8], що негативно впливає на їх роботоздатність, оскільки підвищує ризик аварійних відмов через зростання імовірності крихкого руйнування. На сьогодні немає розроблених критеріїв граничного стану металу для перепрофілюваних трубопроводів, зокрема, за умов використання газопроводів для транспортування водню.

Постановка завдань. Мета роботи полягає в обґрунтуванні критерію досягнення граничного стану трубних сталей за параметром тріщиностійкості з урахуванням експлуатаційної деградації, умов наводнювання, тиску газу в трубі та наявності тріщиноподібних дефектів.

Виклад основного матеріалу. Для обґрунтування критерію досягнення критичного стану трубних сталей використовували результати про їх тріщиностійкість залежно від умов експлуатації, наводнювання та швидкості деформування. Тріщиностійкість металу визначали методом J -інтеграла, враховуючи методичні вимоги [11] з використанням поздовжніх балкових зразків розмірами 4x15x150 мм з боковим надрізом. Досліджували трубну сталь 17Г1С, типу API 5L X52, експлуатовану 38 років на магістральному газопроводі [8, 9]. Її чутливість до водневого окрихчення оцінювали за випробувань без та після попереднього електролітичного наводнювання зразків з тріщинами, яке реалізували в електроліті H_2SO_4 (рН1) + 10 г/л сечовини тривалістю 50 год. за густини струму 0,05 мА/см² та 1 мА/см². Зразки випробовували за швидкості навантаження $v = 0,5, 0,05$ і 0,005 мм/хв. Результати випробувань експлуатованої 38 років сталі 17Г1С приведені на рис. 1 (показник J_{0H} – значення J -інтеграла, визначене для старту тріщини).

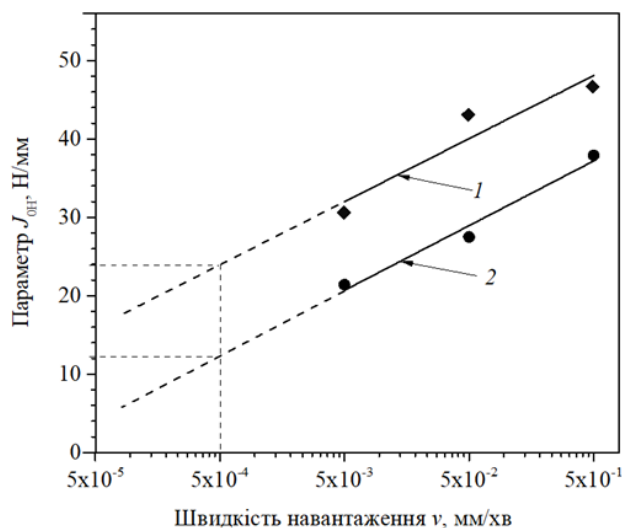


Рис. 1. Залежність параметра J_{0H} від швидкості навантаження v для зразків 38 років експлуатованої сталі 17Г1С після їх попереднього електролітичного наводнювання за густини струму 0,05 мА/см² (1) та 1 мА/см² (2)

Як критерій граничного стану сталі експлуатованого трубопроводу запропоновано використовувати показник в'язкості руйнування K_H , який перераховується з J_{0H} , що визначається експериментально відповідно до підходів нелінійної механіки руйнування, за формулою [11]:

$$K_H = \sqrt{J_{0H} E_{el} / (1 - \nu^2)}, \quad (1)$$

де J_{0H} – рівень в'язкості руйнування, за якого ініціюється ріст тріщини за активного навантаження у сталі, що містить певну концентрацію водню C_H , E_{el} – модуль пружності (Юнга), ν – коефіцієнт Пуассона. Сталь досліджуваного експлуатованого трубопроводу досягає граничного стану за умови, що її в'язкість руйнування K_H за наявної концентрації абсорбованого в процесі експлуатації водню C_H досягла критичного значення K_H^{cr} :

$$K_H = K_H^{cr}. \quad (2)$$

Прийняли, що $K_H^{cr} = 55$ МПа $\cdot\sqrt{м}$ відповідно до американського нормативного документу ASME B31.12 [12] щодо водневих трубопроводів із сталей такої ж категорії міцності API 5L X52, що і сталь 17Г1С, що відповідає у перерахунку $J_{0H}^{cr} = 13,3$ Н/мм.

У процесі експлуатації показник в'язкості руйнування сталі 17Г1С J_{0H} знижується [8, 9]. І тим сильніше, що більша концентрація водню у металі (інтенсивність наводнювання), а з іншого – менша швидкість навантаження. Звідси для коректної оцінки значення в'язкості руйнування сталі досліджуваного газопроводу слід враховувати швидкість навантаження попередньо наводнених зразків при визначенні J_{0H} та напружений стан в тріщині в показниках K_H для певних силових та геометричних умов.

З рис. 1 видно, що навіть за найнижчої швидкості навантаження та високої інтенсивності наводнювання (крива 2) на сталі не досягається рівня J_{0H}^{cr} .

З використанням програми ORIGIN отримані дані описали рівняннями у вигляді лінійних залежностей (рис. 1):

$$\text{Залежність 1 (рис. 1): } J_{0H} = 50,51 + 8,05 \cdot v; \quad (3)$$

$$\text{Залежність 2 (рис. 1): } J_{0H} = 39,67 + 8,05 \cdot v. \quad (4)$$

Залежності апроксимували на менші швидкості навантаження і визначили (рис. 1), що за високої інтенсивності наводнювання за швидкості $5 \cdot 10^{-4}$ очікувано J -інтеграл по старту тріщини може бути близьким до граничного значення, для меншої інтенсивності наводнювання – ця швидкість буде нижчою.

Відомо [13], що між фугітивністю в процесі електролітичного наводнювання та тиском газоподібного водню, які забезпечують однакову концентрацію водню у сталі, встановлена кореляція. Тому у досліджуваних зразках за електролітичного наводнювання за коректно встановленої його фугітивності (i , відповідно, густини струму наводнювання за катодної поляризації) буде досягнута така ж концентрація абсорбованого водню, що і за їх витримки при експлуатаційних тисках водню. Водночас, перевагами застосування електролітичного наводнювання є безпечніші та швидші лабораторні випробування, а отже і експертизи оцінювання технічного стану сталей експлуатованих газопроводів.

Враховуючи встановлений взаємозв'язок між фугітивністю та еквівалентним тиском водню, а також між фугітивністю та густиною струму наводнювання, побудували залежність між еквівалентним тиском водню та густиною струму наводнювання (рис. 2), яку описали лінійним рівнянням з використанням програми ORIGIN:

$$P_{H_2}^{екв} = 0,12 + 9,59 \cdot i \quad (5)$$

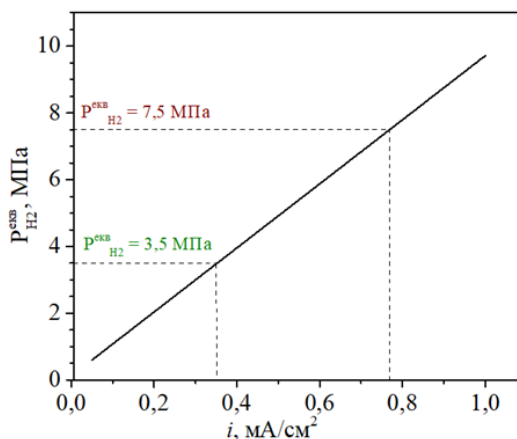


Рис. 2. Залежність між еквівалентним тиском водню в трубі $P_{H_2}^{екв}$ за його фугітивністю, виходячи з величини густини струму наводнювання i

Для обґрунтування (перевірки) критерію вибрали два значення тиску водню: 3,5 та 7,5 МПа. Визначили, що для тиску водню 3,5 МПа еквівалентною є фугітивність 35,5 атм і, відповідно, густина струму катодної поляризації за вибраним режимом електролітичного наводнювання $i = 0,35$ mA/cm^2 , тоді як для тиску водню 7,5 МПа фугітивність – 76,1 атм, а $i = 0,77$ mA/cm^2 .

Припустивши, що між параметрами J_{0H} та i лінійна залежність, провели розрахунок залежності між параметрами J_{0H} та v для $i = 0,35$ та $0,77$ mA/cm^2 . Дані представлені у табл. 1 та на рис. 3. Залежність має наступний вигляд:

$$J_{0H} = 26 \cdot v + 36 - 12 \cdot i \quad (6)$$

Табл. 1.

Експериментальні і розрахункові дані параметра J_{0H} для експлуатованої сталі 17Г1С

| Експеримент | | Розрахунок | | Розрахунок | | Експеримент | |
|-----------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|----------------------------|-----------------|
| $i = 0,05$ mA/cm^2 | | $i = 0,35$ mA/cm^2 | | $i = 0,77$ mA/cm^2 | | $i = 1,0$ mA/cm^2 | |
| v , мм/хв | J_{0H} , Н/мм | v , мм/хв | J_{0H} , Н/мм | v , мм/хв | J_{0H} , Н/мм | v , мм/хв | J_{0H} , Н/мм |
| 0,5 | 46,6 | 0,5 | 44,8 | 0,5 | 39,76 | 0,5 | 37,9 |
| 0,05 | 43,0 | 0,05 | 33,1 | 0,05 | 28,06 | 0,05 | 27,5 |
| 0,005 | 30,5 | 0,005 | 31,93 | 0,005 | 26,89 | 0,005 | 21,4 |

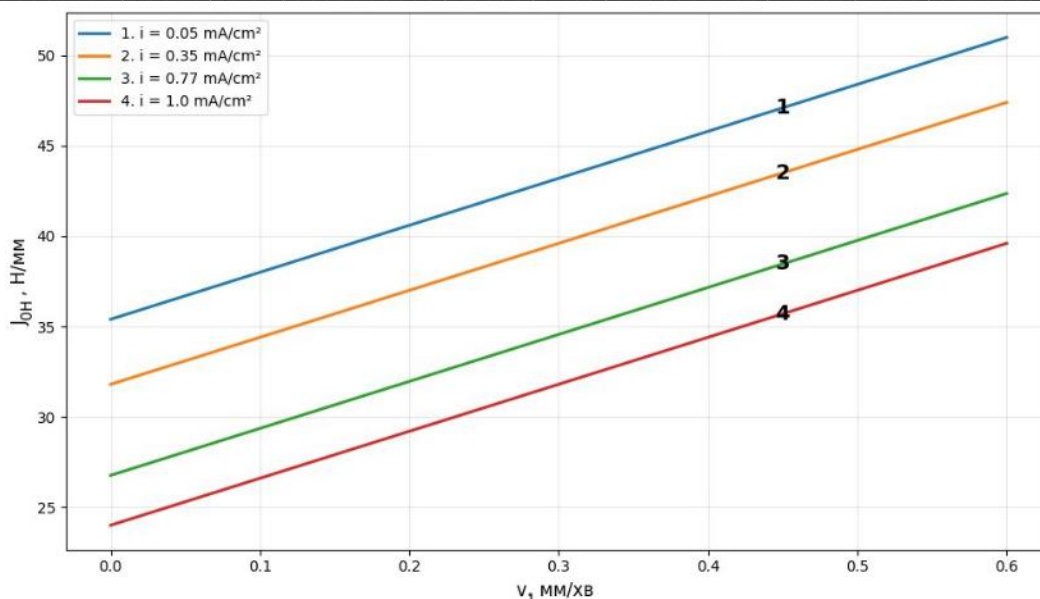


Рис. 3. Залежність параметра J_{0H} від швидкості навантаження для поздовжніх зразків 38 років експлуатованої сталі 17Г1С після електролітичного наводнювання за $i = 0,05$ (1); $0,35$ (2); $0,77$ (3) та $1,0$ mA/cm^2 (4) відповідно до вибраного режиму

Порівняння експериментальних значень параметра J_{0H} та прогнозованих згідно з залежністю (6) наведено на рис. 4. Середньо-квадратична похибка прогнозованих та експериментальних даних складає 3,16 Н/мм.

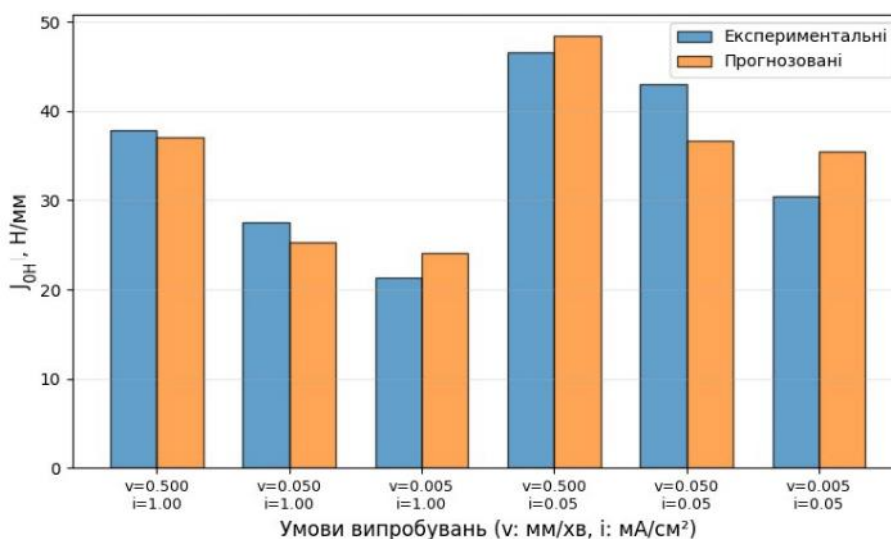


Рис. 4. Порівняння експериментальних значень параметра J_{0H} та прогнозованих згідно з залежністю (6)

Отримані розрахункові результати вказують, що за швидкості навантаження $v = 0,5 \dots 0,005$ мм/хв значення параметра J_{0H} не є нижчими за гранично допустиме (13,3 Н/мм) навіть за високої інтенсивності наводнювання, що вказує на можливість за прийнятим критерієм визнати придатною сталь для подальшої експлуатації за таких умов наводнювання (максимальний еквівалентний тиск водню 9,71 МПа, який відповідає вибраному режиму електролітичного наводнювання за $i = 1,0$ mA/cm^2).

При обґрунтуванні гранично допустимих мінімальних значень показників опору крихкому руйнуванню важливо брати до уваги також можливий напружений стан у вершині внутрішньої тріщини від тиску водню (в параметрах коефіцієнту інтенсивності напружень (КІН), а при потребі і J -інтеграла). Підхід ґрунтується на припущенні, що в експлуатованих трубах газопроводів можуть бути тріщини певних розмірів (глибини a_{cr}), які з різних причин не були виявлені дефектоскопією. Нами розглянуто $a_{cr} = 1-2$ мм.

Згідно з запропонованим підходом прийнято, що сталь досліджуваного експлуатованого трубопроводу досягає граничного стану за умови, що її в'язкість руйнування K_H досягла значення $K_H^{cr}(2)$, яке відповідає коефіцієнту інтенсивності напружень, що реалізується у вершині тріщини за експлуатаційного тиску водню у трубі. Тобто наявна тріщина у стінці труби почне поширюватися коли показник тріщиностійкості наводненого металу K_H знизиться до рівня коефіцієнту інтенсивності напружень K_H^{cr} , що реалізується у вершині тріщини від експлуатаційних напружень.

Для цього у роботі, базуючись на підходах лінійної механіки руйнування, обчислено КІН для труби 1220 x 12 мм для двох значень тиску газу в трубі 3,5 і 7,5 МПа за наявності в ній на внутрішній поверхні напівеліптичної тріщини з осовою або коловою орієнтацією (рис. 5) глибиною $a = 1$ і 2 мм та співвідношенням глибини тріщини до напівдовжини $a/c = 1/3$ та $2/3$ [10].

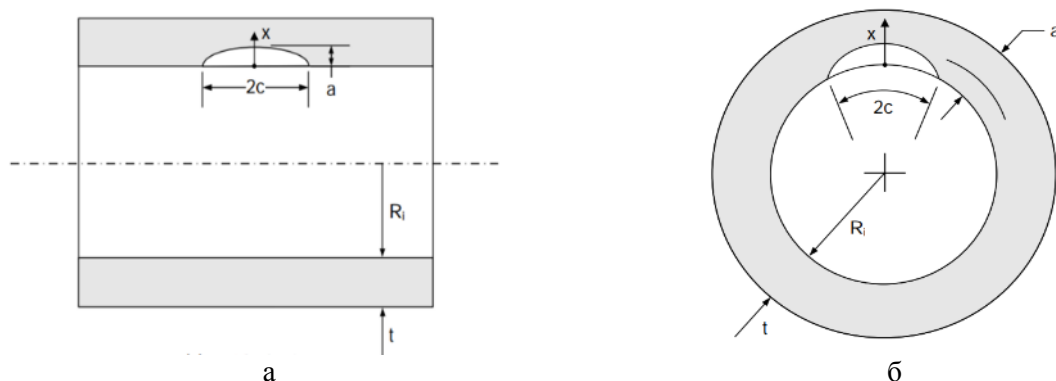


Рис. 5. Схеми труби з внутрішніми напівеліптичними тріщинами осової (а) та колової (б) орієнтації [10]

Для розрахунку КІН для напівеліптичних тріщин в циліндрі в осьовому та коловому напрямку використовували формули відповідно до API 579-1 [10]:

$$K_I = \frac{pR_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \left[2G_0 - 2G_1 \left(\frac{a}{R_i} \right) + 3G_2 \left(\frac{a}{R_i} \right)^2 - 4G_3 \left(\frac{a}{R_i} \right)^3 + 5G_4 \left(\frac{a}{R_i} \right)^4 \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}, \quad (7)$$

$$K_I = \left[G_0 \left(\frac{pR_o^2}{R_o^2 - R_i^2} + \frac{F}{\pi(R_o^2 - R_i^2)} \right) \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}. \quad (8)$$

де

$$Q = 1 + 1.464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1.65}, \quad (9)$$

R_i – внутрішній радіус труби 598 мм, R_o – зовнішній радіус труби 610 мм, φ – параметричний кут, $\frac{2\varphi}{\pi} = 0$ – відповідає точці на поверхні, $\frac{2\varphi}{\pi} = 1$ – найбільш глибокій точці тріщини. Значення коефіцієнтів $G_j \left(\frac{a}{c}, \frac{a}{t}, \frac{t}{R}, \varphi \right)$ – згідно з API 579-1 [9].

У табл. 2 наведено результати розрахунків КІН для колових та осових тріщин на внутрішній поверхні труби.

Табл. 2.

| Результати розрахунків КІН (МПа·√м) для поверхневих напівеліптичних тріщин | | | | | |
|--|---------------|------------------|-----------|-------------------|-----------|
| Тиск P, МПа | Глибина a, мм | Осова орієнтація | | Колова орієнтація | |
| | | a/c = 1/3 | a/c = 2/3 | a/c = 1/3 | a/c = 2/3 |
| 3,5 | 1 | 9,95 | 8,12 | 4,99 | 4,05 |
| | 2 | 14,18 | 11,48 | 7,12 | 5,72 |
| 7,5 | 1 | 21,32 | 17,40 | 10,69 | 8,68 |
| | 2 | 30,38 | 24,60 | 15,26 | 12,25 |

Обчислені значення КІН (табл. 2) вказують на те, що за наведених умов навантаження та геометрії тріщини вони не досягають критичного значення 55 МПа·√м. Це вказує на можливість безпечної подальшої експлуатації труби навіть за довжини тріщини 2 мм та максимального тиску 7,5 МПа. Для параметрів тріщини, за яких отримали найвищий КІН (для $P = 7,5$ МПа, довжини $a = 2$ мм та $a/c = 1/3$) додатково розрахували КІН за довжини тріщини 3 мм – 38,29 МПа·√м. Відповідно, рівень КІН для більшої довжини тріщини та її глибини вже може сягати близького до граничного значення і експлуатація труби з такою тріщиною може бути проблематичною.

Проведений аналіз слід розглядати як перший етап в обґрунтуванні безпечної експлуатації трубопроводів в контексті транспортування водню.

Висновки. Тривало експлуатована сталь магістрального газопроводу є чутливою до водневого окрихнення за параметром тріщиностійкості, що особливо проявляється за низьких швидкостей навантаження зразків та високої інтенсивності наводнювання. Запропоновано критерій граничного стану сталей за показником в'язкості руйнування, який визначається експериментально методом J -інтеграла з урахуванням умов наводнювання, тиску газу в трубі, наявності тріщиноподібних дефектів та ступеня експлуатаційної деградації. Показано, що для сталі 17Г1С після тривалої експлуатації за певних режимів наводнювання та низьких швидкостей навантаження тріщиностійкість може знижуватись до граничного рівня, що свідчить про втрату її придатності до подальшої експлуатації, зокрема, в умовах транспортування водню. Розрахунки коефіцієнта інтенсивності напружень для напівеліптичних тріщин у трубах засвідчили, що за розглянутих умов навантаження та геометрії дефектів рівні КІН не досягають граничного значення, що вказує на можливість безпечної експлуатації труб з дефектами глибиною до 2 мм при тиску до 7,5 МПа. Запропонований підхід може бути використаний для оцінювання робоздатності сталей магістральних газопроводів при їх перепрофілюванні для транспортування водню, а також для розробки критеріїв їх безпечної експлуатації з урахуванням експлуатаційної деградації сталей та впливу водню.

Список використаних джерел.

1. Campari A., Ustolin F., Alvaro A., Paltrinieri N. A review on hydrogen embrittlement and risk-based inspection of hydrogen technologies // International Journal of Hydrogen Energy. – 2023. – Vol. 48, No. 90. – P. 35316–35346.
2. Zvirko O., Tsyurulnyk O., Venhryniuk O., Nykyforchyn H. Hydrogen related issues at hydrogen transport via existing gas pipelines. In: Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure. Springer, Cham. – 2025. – P. 210–219.
3. Dadfarnia M., Sofronis P., Brouwer J., Sosa S. Assessment of resistance to fatigue crack growth of natural gas line pipe steels carrying gas mixed with hydrogen // International Journal of Hydrogen Energy. – 2019. – Vol. 44, No. 21. – P. 10808–10822.
4. Cabrini M., Sinigaglia E., Spinelli C., Tarenzi M., Testa C., Bolzoni, F.M. Hydrogen embrittlement evaluation of micro alloyed steels by means of J -integral curve // Materials. – 2019. – Vol. 12, Art. No. 1843. – P. 1–17.
5. Kyriakopoulou H.P., Karmiris-Obratański P., Tazedakis A.S., Daniolos N.M., Dourdounis E.C., Manolakos D.E., Pantelis D. Investigation of hydrogen embrittlement susceptibility and fracture toughness drop after in situ hydrogen cathodic charging for an X65 pipeline steel // Micromachines. – 2020. – Vol. 11, Art. No. 430. – P. 1–20.
6. Maruschak P.O., Danyliuk I.M., Bishchak R.T., Vuherer T. Low temperature impact toughness of the main gas pipeline steel after long-term degradation // Central European Journal of Engineering. – 2014. – Vol. 4. – P. 408–415.
7. Zvirko O.I. In-service degradation of structural steels (A Survey) // Materials Science. – 2022. – Vol. 57, No. 3. – P. 319–330.
8. Nykyforchyn H.M., Zvirko O.I., Tsyurulnyk O.T., Venhryniuk O.I. Assessing hydrogen embrittlement of gas pipeline steels using fracture mechanics approaches // International Applied Mechanics. – 2025. – Vol. 61. – P. 207–211.
9. Nykyforchyn H., Tsyurulnyk O., Krechkovska H., Hredil M., Venhryniuk O. The effect of in-service degradation of X52 gas pipe steel on fracture toughness of hydrogenated specimens evaluated by the J -integral method // Procedia Structural Integrity. – 2025. – Vol. 68. – P. 861–867.
10. API 579-1/ASME FFS-1, Fitness-For-Service. – June, 2016.
11. Standard test method for J -integral characterization of fracture toughness. ASTM. E 1737. Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness.
12. ASME B31.12. Hydrogen Piping & Pipelines. – Digital Book. – ASME, 2023. – 268 p.
13. Liu Q., Gray E., Venezuela J., Zhou Q., Tapia-Bastidas C., Zhang M., Atrens A. Equivalent hydrogen fugacity during electrochemical charging of 980DP steel determined by thermal desorption spectroscopy // Advanced Engineering Materials. – 2018. – Vol. 20, No. 1, Art. No. 1700469.

Рецензент: Никифорчин Григорій Миколайович, провідний науковий співробітник відділу діагностики корозійно-водневої деградації матеріалів Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України, д.т.н., проф.