

Оцінка ресурсу трубопроводів зі зварними з'єднаннями у водневому середовищі

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.096>

Богдан Маркович

Національний університет «Львівська політехніка»
Львів, Україна
bohdan.m.markovych@lpnu.ua

Богдана Гайвась

Інститут прикладних проблем механіки і
математики ім. Я.С. Підстригача
Національна академія наук України
Львів, Україна
bogdana.gayvas@gmail.com

Анатолій Дмитрук

Національний університет «Львівська політехніка»
Львів, Україна
anatolii.a.dmytruk@lpnu.ua

Вероніка Дмитрук

Національний університет «Львівська політехніка»
Львів, Україна
dmytruk15@gmail.com

Анотація— Запропоновано інтегрований метод прогнозування ресурсу магістральних трубопроводів зі сталей X60–X80 у зонах зварного з'єднання з урахуванням впливу водню. Метод поєднує часові моделі зародження та росту тріщини з перевіркою експлуатаційної придатності за віртуальною діаграмою оцінювання придатності. На основі аналітичних виразів визначено час зародження та розвитку тріщини в базових умовах і за наявності водню. Введено ефективні параметри тріщиностійкості та порогу росту, що відображають деградацію властивостей сталі та вплив залишкових напружень у зоні зварного шва. Проведено числовий експеримент, який показав суттєве скорочення ресурсу труби у водневому середовищі. Застосування віртуальної діаграми оцінювання придатності підтвердило необхідність урахування додаткових коефіцієнтів безпеки для зварних з'єднань. Отримані результати мають практичне значення для підвищення надійності трубопровідних систем і планування інтервалів технічної діагностики.

Ключові слова— математичне моделювання; зварне з'єднання; ресурс трубопроводу; воднева крихкість; часові моделі росту тріщини; віртуальна діаграма оцінювання придатності

I. ВСТУП

Магістральні нафтогазові трубопроводи працюють у складних корозійно-механічних умовах, де зародження та ріст тріщин визначають реальний ресурс труб і інтервали технічного обслуговування [1, 2]. Під тріщиною розуміють локальне руйнування матеріалу у вигляді вузької порожнини, яка може виникати на внутрішній або зовнішній поверхні стінки труби. Особливо небезпечними є тріщини, що розвиваються у зонах зварних з'єднань: зварний метал (ЗМ) - металева ділянка, що безпосередньо утворюється під час зварювання; зона термічного впливу (ЗТВ) - ділянка, прилегла до зварного шва, де температура під час зварювання призводить до зміни мікроструктури та механічних

властивостей сталі; основний метал (ОМ) - незмінена зона труби поза впливом зварювання.

Класичні підходи до оцінювання ресурсу спираються на часові моделі зародження та подальшого розвитку тріщини або еквівалентні залежності для швидкості її росту [3]. Такі моделі враховують режим потоку (ламінальний чи турбулентний), геометрію дефекту та механічні характеристики сталі, що дозволяє оцінювати інтервали діагностики й ремонту безпосередньо у часових одиницях.

Водночас, перехід до воднево-орієнтованих сервісних умов висуває додаткові вимоги до надійності. Відомо, що найбільшу небезпеку становить явище водневої крихкості металів, коли атомарний водень, проникаючи в кристалічну ґратку сталі, акумулюється біля дефектів структури - дислокацій, міжзернових меж, порожнин. Це призводить до різкого зниження пластичності та ударної в'язкості матеріалу і робить труби вразливими навіть до відносно невеликих навантажень. В умовах дії циклічних навантажень водень знижує поріг витривалості, прискорює зародження та розвиток мікротріщин, а також сприяє швидкому росту існуючих дефектів. Біля вершин тріщин, де концентруються максимальні розтягувальні напруження, локальне збагачення воднем суттєво зменшує опір поширенню руйнування, що призводить до воднево-індукованого розтріскування [1].

Зварні з'єднання, а особливо ЗТВ, є найуразливішими ділянками для впливу водню через мікроструктурну неоднорідність і залишкові напруження [2]. У цих умовах стандартні діаграми оцінювання придатності (ДОП) можуть бути неконсервативними для зварних з'єднань, тому потребують уточнення з урахуванням впливу водню та локальних властивостей [4].

Отже, постає практично важливе завдання - поєднати часово орієнтовані моделі ресурсу труб із перевіркою їхньої експлуатаційної придатності в термінах ДОП, з урахуванням водневої крихкості та неоднорідності зварних з'єднань. Така інтеграція має:

(i) забезпечити інженерну простоту інтегральних розрахунків часу зародження та подальшого розвитку тріщини;

(ii) коректно врахувати локальні ефекти і залишкові напруження;

(iii) забезпечити консервативність оцінки через віртуальну діаграму оцінювання придатності (ВДОП), модифіковану діаграму оцінювання придатності, яка базується на статистичній симуляції множини сценаріїв руйнування, запропоновану Wijnen, Parker, Gagliano, Martínez-Pañeda.

Мета роботи полягає у створенні інтегрованої методики для прогнозування ресурсу трубопроводів зі сталей X60-X80 у зоні ЗМ, що враховує водневу деградацію матеріалу та перевіряє експлуатаційну придатність за ВДОП.

II. МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ОЦІНЮВАННЯ РЕСУРСУ СТАЛЕВИХ ТРУБОПРОВОДІВ

Класичний підхід до оцінювання довговічності магістральних труб спирається на поділ ресурсу на період зародження тріщини t_a та період її розвитку t_{growth} з інтегруванням швидкості її поширення $V(\Delta K)$.

У роботі [5] наведено узагальнені аналітичні формули для t_a , t_{growth} і $t_p = t_a + t_{growth}$ із урахуванням режиму потоку, коефіцієнта інтенсивності напружень, геометрії дефекту, а також емпіричних корекцій середовища для сталей X60–X80 [6, 7, 8, 9].

Закон росту тріщини задається в рамках функції $\phi(\Delta K)$, що узгоджується зі стандартним парисівським описом втомного росту тріщин [10]. Такий підхід зручний для планування інтервалів діагностики/ремонтів, оскільки дає часові оцінки.

У практиці інженерного аналізу дефектів широко використовують ДОП, яка порівнює відносні навантаження L_r і відносну тріщиностійкість K_r з допустимою кривою. Рекомендації та процедури для побудови/застосування ДОП регламентуються стандартами BS 7910:2019 (оцінка дефектів у металевих конструкціях) та API 579-1/ASME FFS-1:2021 (оцінка придатності до експлуатації обладнання). Ці документи забезпечують практичну базу для швидкої перевірки «безпечно/небезпечно», але здебільшого виходять із гомогенних властивостей матеріалу і не описують часову еволюцію $a(t)$, що критично для планування ресурсу.

Водень знижує в'язкість руйнування K_{lc} , поріг втомного росту ΔK_{th} і пластичність сталей; найуразливішими є зони зварних з'єднань: метал шва (ЗМ) і ЗТВ.

Мікроструктурна неоднорідність (частка беніту/фериту), градієнти твердості та залишкові напруження сильно впливають на локальний опір руйнуванню. У таких умовах застосування стандартних ДОП без додаткових поправок може давати неконсервативні оцінки придатності.

Сучасні роботи пропонують ВДОП - діаграми, що будуються на основі фізично обґрунтованого моделювання з урахуванням локальних властивостей для ОМ/ЗМ/ЗТВ. Зокрема, [4] показали, що для однорідного металу в нейтральному середовищі ВДОП узгоджуються зі стандартними ДОП, тоді як для зварних з'єднань у водневому середовищі стандартні діаграми ДОП можуть бути занадто оптимістичними, тому потрібні додаткові коефіцієнти безпеки і локалізовані параметри $K_{lc}^{eff}(C_H, zone)$, $\Delta K_{th}^{eff}(C_H, zone)$.

Наявні часові моделі ресурсу труб (див. [6, 7, 8, 9]) зазвичай використовують гомогенізовані характеристики та не враховують явної залежності від C_H і зони зварного з'єднання; з іншого боку, ВДОП [4] дають моментальну перевірку придатності в координатах (L_r, K_r) , але не надають безпосередньо часових оцінок t_a , t_{growth} , t_p .

Це мотивує до створення інтегрованої схеми, у якій локальні ефективні параметри - коефіцієнт тріщиностійкості K_{lc}^{eff} , пороговий діапазон коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK_{th}^{eff} та, за потреби, залишкове напруження σ_{res} враховуються у часових інтегралах. Отримані результати перевіряються за ВДОП із застосуванням рекомендованих коефіцієнтів безпеки.

III. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Розглядається відрізок прямолінійної труби зі сталі X60, діаметром D і товщиною стінки δ , яка експлуатується під дією внутрішнього тиску $p(t)$ у циклічному (маневровому) режимі. На внутрішній поверхні в зоні термічного впливу ЗМ (ЗТВ) розташований подовжній поверхневий дефект початкової глибини a_0 .

Задача полягає в оцінюванні ресурсу труби до досягнення критичної глибини тріщини a_{crit} з урахуванням впливу водню на локальні характеристики тріщиностійкості.

Основні завдання - отримати узгоджену процедуру оцінювання ресурсу труби зі сталі X60 з внутрішнім поверхневим дефектом у ЗТВ при циклічному тиску, з урахуванням впливу водню. Метод складається з чотирьох зв'язаних кроків: (i) розрахунок часових інтегралів зародження та росту

тріщин за методикою [5]; (ii) локалізація параметрів для ЗТВ та водню; (iii) визначення критичної точки та повний ресурс; (iv) перевірка ВДОП і, за потреби, консервативна корекція [4].

IV. МЕТОДИКА ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ

Для тонкостінного циліндра тангенціальне (колове) напруження визначається за формулою

$$\sigma = \frac{pD}{2\delta}, \quad \Delta\sigma = \frac{(p_{\max} - p_{\min})D}{2\delta}. \quad (1)$$

Для внутрішнього подовжнього поверхневого дефекту маємо

$$K_I(a) = \sigma\sqrt{\pi a} Y\left(\frac{a}{\delta}\right), \quad \Delta K(a) = \Delta\sigma\sqrt{\pi a} Y\left(\frac{a}{\delta}\right). \quad (2)$$

Тут $Y(\cdot)$ - геометричний коефіцієнт; у межах відносно короткого ініціального інтервалу допускаємо консервативну апроксимацію $Y \square Y_0$ (для аналітичних інтегралів), а при потребі уточнюємо $Y(a/\delta)$ чисельно [6].

Використовуючи узагальнену модель $\varphi(\Delta K)$ для швидкості росту тріщини [6, 7], що сумісна з законом Паріса–Ердогана [10], отримаємо:

$$\frac{da}{dN} = C[\Delta K(a)]^m,$$

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta\sigma\sqrt{\pi}Y_0)^m a^{m/2}, \quad (\text{if } Y \square Y_0), \quad (3)$$

де C, m - експериментально визначені матеріальні константи, що характеризують кінетику росту тріщин в сталі залежно від виду та характеристик середовища.

Кінець ініціації визначаємо пороговою умовою

$$\Delta K(a_{tr}) = \Delta K_{th}, \quad a_{tr} = \left(\frac{\Delta K_{th}}{\Delta\sigma\sqrt{\pi}Y_0} \right)^2. \quad (4)$$

Тоді кількість циклів ініціації та час:

$$N_a = \int_{a_0}^{a_{tr}} \frac{da}{C(\Delta\sigma\sqrt{\pi}Y_0)^m a^{m/2}} = \frac{a_{tr}^{1-\frac{m}{2}} - a_0^{1-\frac{m}{2}}}{C(\Delta\sigma\sqrt{\pi}Y_0)^m \left(1 - \frac{m}{2}\right)},$$

$$t_a = \frac{N_a}{n}, \quad (5)$$

де n - середня річна кількість циклів навантаження у режимі експлуатації [8, 9]. Для стадії росту тріщини до критичного стану інтегруємо:

$$N_{growth} = \int_{a_{tr}}^{a_{crit}} \frac{da}{C(\Delta\sigma\sqrt{\pi}Y_0)^m a^{m/2}} = \frac{a_{crit}^{1-\frac{m}{2}} - a_{tr}^{1-\frac{m}{2}}}{C(\Delta\sigma\sqrt{\pi}Y_0)^m \left(1 - \frac{m}{2}\right)},$$

$$t_{growth} = \frac{N_{growth}}{n}. \quad (6)$$

Критичний розмір визначаємо за LEFM або геометричним обмеженням:

$$a_{crit}^{(K)} = \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma\sqrt{\pi}Y_0} \right)^2, \quad a_{crit} = \min\{a_{crit}^{(K)}, \delta\},$$

$$t_p = t_a + t_{growth}. \quad (7)$$

З огляду на неоднорідність зварного з'єднання та водневу крихкість [4], замінюємо матеріальні параметри на ефективні локальні:

$$K_{Ic} \rightarrow K_{Ic}^{eff}(C_H, \text{zone}), \quad \Delta K_{th} \rightarrow \Delta K_{th}^{eff}(C_H, \text{zone}), \quad (8)$$

а кінетичні коефіцієнти - на (C_H, m_H) . Для амплітудно зумовленого росту зберігаємо форму:

$$\Delta K^{eff}(a) = \Delta\sigma\sqrt{\pi a} Y\left(\frac{a}{\delta}\right), \quad (9)$$

а залишкові напруження σ_{res} враховуємо в оцінці K_I^{eff} (середній рівень) і, головне, у деградації K_{Ic} та порозі ΔK_{th} :

$$K_I^{eff}(a) = (\sigma + \sigma_{res})\sqrt{\pi a} Y\left(\frac{a}{\delta}\right). \quad (10)$$

Тоді:

$$a_{tr}^{(H)} = \left(\frac{\Delta K_{th}^{eff}}{\Delta\sigma\sqrt{\pi}Y_0} \right)^2,$$

$$N_a^{(H)} = \int_{a_0}^{a_{tr}^{(H)}} \frac{da}{C_H(\Delta\sigma\sqrt{\pi}Y_0)^{m_H} a^{m_H/2}},$$

$$N_{growth}^{(H)} = \int_{a_{tr}^{(H)}}^{a_{crit}^{(H)}} \frac{da}{C_H(\Delta\sigma\sqrt{\pi}Y_0)^{m_H} a^{m_H/2}},$$

$$a_{crit}^{(H)} = \min\left\{ \left(\frac{K_{Ic}^{eff}}{\sigma\sqrt{\pi}Y_0} \right)^2, \delta \right\},$$

$$t_p^{(H)} = \frac{N_a^{(H)} + N_{growth}^{(H)}}{n}. \quad (11)$$

Для валідації експлуатаційної придатності визначаємо

$$L_r = \frac{\sigma}{\sigma_{flow}}, \quad K_r = \frac{K_{Ic}^{eff}}{K_{Ic}^{eff}}, \quad (12)$$

та перевіряємо розташування робочої точки відносно ВДОП для відповідної зони (ОМ/ЗМ/ЗТВ)

і рівня C_H . Якщо точка наближена до граничної кривої, вводимо додатковий коефіцієнт безпеки $\gamma_F \in [1.3, 1.6]$ до часових оцінок:

$$t_{p, \text{cons}}^{(H)} = \frac{t_p^{(H)}}{\gamma_F}. \quad (13)$$

Далі розглянемо результати числових досліджень.

V. ЧИСЛОВИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ

Для демонстрації застосовності методу виконано обчислення для труби зі сталі Х60 з параметрами, характерними для магістральних водневих трубопроводів.

ТАБЛИЦЯ 1. ВХІДНІ ПАРАМЕТРИ

Параметр	Baseline (повітря)	HAZ+H (водень)
Діаметр D , мм	530	530
Товщина δ , мм	12	12
Початкова тріщина a_0 , мм	3	3
$p_{\text{max}}, p_{\text{min}}$, МПа	7; 5	7; 5
Амплітуда тиску Δp , МПа	2	2
Окружне напруження σ , МПа	$\frac{pD}{2\delta} \approx 154.6$	те ж
Геометр. коеф. Y_0	1.1	1.1
Коеф. Паріса C	$5 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-9}$
Показник m	3	3
Поріг ΔK_{th} , МПа $\sqrt{\text{м}}$	6	2
K_{Ic}^{eff} , МПа $\sqrt{\text{м}}$	50	30
Кількість циклів/рік n	10^4	10^4

На рис. 1 показано еволюцію глибини тріщини $a(N)$ для двох сценаріїв: повітря та водень. Для обох випадків використано однакові геометричні параметри та навантаження, а відмінність зумовлена лише параметрами середовища ($C, m, \Delta K_{th}$ проти $C_H, m_H, \Delta K_{th}^{\text{eff}}$).

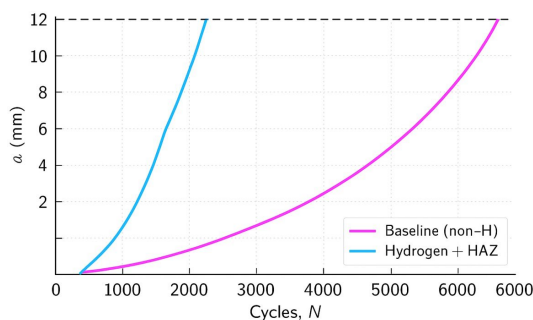


Рисунок 1. Зростання глибини тріщини a зі збільшенням кількості циклів N для сталеві труби Х60 (базовий vs водневий випадки). Пунктирною лінією позначено граничну товщину стінки $a_{\text{crit}} = \delta$.

За описаних навантажень за нейтральних умов експлуатації сталеві труби існує помітний ініціаційний інтервал ($t_a \sim 2.5$ роки), після чого ріст тріщин прискорюється, і загальний ресурс труби становить ~ 5.7 років. У випадку з воднем з дефектом у ЗТВ поріг $\Delta K_{th}^{\text{eff}}$ низький, тому ініціація фактично відсутня, і процес відразу входить у режим росту тріщин; ресурс труби зменшується до ~ 1.7 року. Корекція за допомогою ВДОП

забезпечує консервативність оцінки ресурсу для зварних з'єднань у водні.

ВИСНОВКИ

Для труби зі сталі Х60 із дефектом у ЗТВ, отримано повний ресурс за прийнятих параметрів циклічного навантаження для базового (повітря) і водневого випадків. Результати показали, що в умовах наявності водню та зварної зони повний ресурс труби скорочується майже у 4 рази і при цьому стадія ініціації практично зникає. Перевірка робочої точки на ВДОП показала, що без врахування додаткового запасу оцінка може бути неконсервативною. Введення коефіцієнта безпеки $\gamma_F = 1.3 - 1.6$ зменшує розрахунковий ресурс до 0.9-1.1 року, що відповідає практичним вимогам безпеки для трубопроводів у водневому середовищі. Новизна підходу полягає у поєднанні часово орієнтованої методики з валідацією через ВДОП. Такий гібридний підхід дозволяє одержати консервативні оцінки ресурсу для зварних труб у водневому середовищі. Практичні наслідки показали, що зниження амплітуди коливань тиску Δp та контроль вмісту водню у середовищі здатні суттєво збільшити ресурс, а особлива увага має бути приділена ЗТВ зварних з'єднань, де деградаційні ефекти проявляються найсильніше.

REFERENCES

- [1] S. P. Lynch, "Hydrogen embrittlement phenomena and mechanisms," *Corrosion Reviews*, vol. 30, no. 3–4, pp. 105–123, 2012. doi:10.1515/corrrev-2012-0502.
- [2] R. P. Gangloff, "Hydrogen-assisted cracking of high-strength alloys," in *Stress corrosion cracking*, R. H. Jones, Ed. ASM International, pp. 127–162, 2003.
- [3] A. R. Troiano, "The role of hydrogen and other interstitials in the mechanical behavior of metals," *Metallurgical Transactions*, vol. 52, pp. 54–76, 1960.
- [4] J. Wijnjen, J. Parker, M. Gagliano, and E. Martínez-Pañeda, "Virtual failure assessment diagrams for hydrogen transmission pipelines," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 149, p. 149984, 2025. doi:10.1016/j.ijhydene.2025.149984.
- [5] O. Ye. Andrejkiv and I. Ya. Dolinska, *Prohnozuvannya zalyshkovoho resursu trub naftohazoprovodiv z urakhuvanniam umov ekspluatatsii i dehratsii yikh materialiv*. Kyiv: Naukovo-vyrobnyche pidpriemstvo "Naukova Dumka" NAN Ukrainy, 2023, 268 p. ISBN 978-966-00-1852-5. doi:10.15407/978-966-00-1852-5.
- [6] A. I. Raichenko, *Matematychna teoriia dyfuzii u zastosuvanniakh*. Kyiv: Naukova Dumka, 1981, 396 p.
- [7] W. Y. Choo, I. Y. Lee, C. G. Cho, and S. H. Hwang, "Hydrogen solubility in pure iron and effects of alloying elements on the solubility in the temperature range 20 to 500 °C," *Journal of Materials Science*, vol. 16, no. 5, pp. 1285–1292, 1981.
- [8] O. Andrejkiv, O. Hembara, and I. Dolinska, "Prediction of residual service life of pipeline under non-stationary oil flow taking into account steel degradation," in G. Bolzon and G. Gabetta (Eds.), *Degradation Assessment and Failure Prevention of Pipeline Systems*, Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 102. Cham: Springer, pp. 203–216, 2021.
- [9] O. Tsyhulnyk, Z. Slobodyan, M. Hrebel "Elektrokhimichni pokaznyky ekspluatatsiinoi prydatnosti naftohazoprovodiv," *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv*, Spec. issue no. 5, pp. 284–289, 2006.
- [10] P. C. Paris and F. Erdogan, "A critical analysis of crack propagation laws," *Journal of Basic Engineering*, vol. 85, no. 4, pp. 528–533, 1963. doi:10.1115/1.3656900.