

УДК 620.197.5:669.788

АНАЛІЗ ЗАЛИШКОВОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ ТРУБ З ВНУТРІШНІМИ ПІВЕЛІПТИЧНИМИ ТРІЩИНАМИ У ВОДНЕВОВМІСНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

О.Я. ЧЕПІЛЬ^{1,2}, І.М. СОВ'ЯК^{1,3}, А.М. СИРОТЮК¹

¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів

²Bydgoszcz University of Science and Technology, Poland

³Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

Запропоновано теоретичну модель оцінювання залишкової втомної довговічності трубопроводів з внутрішніми півеліптичними тріщинами за сумісної дії тиску робочого середовища, загальної концентрації водню у металі та геометрії дефекту (співвідношення a/c). Експериментальні значення порогового й критичного розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень, а також параметри швидкості росту тріщин апроксимовано аналітичними функціями від концентрації водню, що дозволило отримати замкнені залежності довговічності без застосування числового моделювання. Проведено параметричний аналіз у широкому діапазоні тисків, концентрацій та співвідношень a/c і виявлено їх відносний вплив на ресурс конструкції. Отримані вирази придатні для інженерних оцінок безпечного терміну експлуатації труб.

Ключові слова: водневе окрихчення, напружено-корозійна втома, півеліптична тріщина, залишкова міцність, трубопровід.

A theoretical framework is proposed for assessing the residual fatigue life of pipelines containing internal semi-elliptical surface cracks under the combined effect of internal pressure, total hydrogen concentration in the metal, and defect geometry (aspect ratio a/c). The experimentally obtained threshold and critical stress intensity factor ranges, as well as the crack growth rate parameters, are approximated by analytical functions of hydrogen concentration. This enables closed-form lifetime predictions without the need for numerical simulation. A parametric analysis was carried out over a wide range of pressures, hydrogen concentrations, and a/c ratios, revealing their relative influence on structural durability. The resulting expressions are suitable for engineering-level estimates of safe pipeline service life.

Keywords: hydrogen embrittlement, stress corrosion fatigue, semi-elliptical crack, residual strength, pipeline.

Вступ. У сучасних умовах глобального переходу до відновлюваних джерел енергії значну увагу приділяють водню як альтернативному енергоносію. Розвиток інфраструктури для транспортування і зберігання водню вимагає переоцінки надійності традиційних металевих трубопроводів, зокрема сталевих. Відомо, що взаємодія водню з металом призводить до деградації механічних властивостей – явища, що отримало назву водневого окрихчення [1-4]. Суттєве зниження тріщиностійкості та втомної довговічності металів унаслідок дії водню є одним з основних обмежень для широкого впровадження водневої енергетики [5]. Для точного оцінювання умов водневого насичення важливо враховувати хімічний потенціал водню у металі, що обґрунтовано у [6].

З-поміж численних механізмів руйнування, особливо небезпечним є напружено-корозійне втомне розтріскування, яке ініціюється в мікрodefектах на внутрішній поверхні труб. У реальних умовах експлуатації найбільш типовими дефектами є внутрішні півеліптичні тріщини, що утворюються внаслідок корозії, ерозії або механічних пошкоджень. Їхня критичність визначається як розмірами, так і умовами навантаження, зокрема, внутрішнім тиском та вмістом водню в металі. Методи оцінювання коефіцієнтів дифузії водню в металах розглянуто в [7]. Традиційні методи оцінки довговічності таких об'єктів ґрунтуються на чисельному моделюванні та значному обсязі вхідних параметрів [8,9], що перешкоджає інженерному застосуванню.

Останніми роками значну увагу приділяють створенню спрощених аналітичних моделей, які дозволяють швидко та досить точно оцінити залишковий ресурс трубопроводів. У публікаціях [1–4] подано низку підходів до моделювання водневої втоми, однак більшість із них або не враховують геометрію тріщин, або вимагають використання складного чисельного аналізу [10]. При цьому експериментальні залежності коефіцієнтів закону Паріса та меж руйнування від концентрації водню в металі все частіше описуються аналітичними функціями, що відкриває шлях до побудови замкнених моделей довговічності.

Експериментальна база та апроксимація даних. Для побудови теоретичної моделі було використано власний масив експериментальних даних, отриманий на зразках трубної сталі 20. Зразки-пластини типу SE(B) насичувалися воднем катодною поляризацією у 3,5 % розчині NaCl з додаванням 1 г/л NH₄SCN при потенціалі –1,05 В відносно електрода Ag/AgCl протягом чотирьох годин [6, 7]. У результаті було отримано чотири рівні сумарної концентрації водню в металі: 0,074; 0,361; 1,030 та 5,462 ppm, що підтверджено аналізатором дифузійно-рухомого і пасткованого водню LECO DH-603 з похибкою ±0,01 ppm.

Випробування проводилися за умов циклічного навантаження на сервогідравлічній машині (10 Гц, R = 0,1, температура 22 °C), із застосуванням стандартної схеми SE(B). Методика відповідає вимогам ASTM E647 [1]. Для кожного рівня концентрації водню визначали порогове значення розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK_{th} , критичний розмах ΔK_{fc} , а також коефіцієнти закону Паріса A і n за формулою:

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^n, \quad (1)$$

Щоб інтегрувати експеримент у розрахункову модель, усі чотири характеристики були апроксимовані авторськими аналітичними залежностями від концентрації водню C_H . Найкращу

збіжність ($R^2 > 0,97$) продемонстрували експоненційно-степеневі функції. Зокрема, залежності $\Delta K_{th}(C_H)$ та $\Delta K_{fc}(C_H)$ описано сумою сталої та спадної експоненти; параметр $A(C_H)$ – як суму трьох експонент з різними темпами затухання; експоненту $n(C_H)$ апроксимовано логарифмічною функцією. Регресійний аналіз здійснювався в програмі OriginPro 2023 методом найменших квадратів. Середньоквадратичне відхилення між експериментом і моделлю не перевищувало 5 %.

Подібні форми апроксимацій узгоджуються з публікаціями інших авторів. Зокрема, у [2–4, 11, 12] експериментально показано, що вплив водню на тріщиностійкість вуглецевих і низьколегованих сталей зазвичай призводить до експоненційного зменшення K_{fc} і K_{th} , тоді як параметр n має тенденцію до зростання.

Таким чином, подальший теоретичний аналіз спирається виключно на апроксимовані функції, що адекватно репрезентують емпіричні залежності в межах дослідженого діапазону концентрацій водню.

Параметр	Аналітична форма
Пороговий розмах КІН	$\Delta K_{th}(C_H) = 7.13 + 11.9 \exp(-16C_H)$ (2)
Критичний розмах КІН	$\Delta K_{fc}(C_H) = 16.65 + 14.1 \exp(-6.36C_H)$ (3)
Коефіцієнт Паріса	$A(C_H) = 10^{-10} + 1.3 \cdot 10^{-9} \exp(-0.5C_H) + 10^{-8} \exp(-13.6C_H)$ (4)
Показник Паріса	$n(C_H) = 4.39 + 0.59 \ln C_H$ (5)

Теоретичне обґрунтування оцінки залишкової довговічності. Навантажувальний стан трубного сегмента описується мембранною напругою

$$\sigma = \frac{p R_i}{t}, \quad (6)$$

де p – внутрішній тиск, R_i – внутрішній радіус, t – товщина стінки. Для осової півеліптичної тріщини, розташованої на внутрішній поверхні, максимальний коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) у найбільш критичній точці О визначається еталонним виразом Newman–Raju [1]:

$$K_I(a) = 0.97 F\left(\frac{a}{c}\right) \sigma \sqrt{\pi a} \left(\frac{R_a^2 + R_i^2}{R_a^2 - R_i^2} + 1 - 0.5 \sqrt{\frac{a}{t}} \right) \frac{t}{R_i}, \quad R_a = R_i + t \quad (7)$$

де $R_a = R_i + t$ – зовнішній радіус; a , c – глибина і півдовжина тріщини; $F(a/c)$ – геометричний множник, що враховує форму дефекту.

Останній обчислюється за емпіричною формулою:

$$F\left(\frac{a}{c}\right) = \frac{M_1 + M_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{t}\right)^4}{\sqrt{1 + 1.464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1.65}}}, \quad (8)$$

де параметри M_1, M_2, M_3 визначаються як:

$$M_1 = 1.13 - 0.09 \frac{a}{c}, \quad M_2 = -0.54 + \frac{0.89}{0.2 + \frac{a}{c}}, \quad M_3 = 0.50 - \frac{1}{0.65 + \frac{a}{c}} + 14 \left(1 - \frac{a}{c}\right)^{24} \text{ Порогова } (a_{th}) \text{ та}$$

критична (a_{fc}) глибини тріщини визначаються з рівностей:

$$K_I(a_{th}) = \Delta K_{th}(C_H), \quad K_I(a_{fc}) = \Delta K_{fc}(C_H), \quad (9)$$

де $\Delta K_{th}(C_H)$ і $\Delta K_{fc}(C_H)$ — експоненційні функції сумарної концентрації водню (2) і (3).

Числовий розв'язок цих рівнянь у межах $0 < a < t$ дозволяє однозначно знайти допустимі значення a_{th} та a_{fc} для будь-якого набору параметрів $p, t, C_H, a/c$.

Швидкість росту втомної тріщини розраховується за воднево-чутливою формою закону Паріса:

$$\frac{da}{dN} = A(C_H) [K_I(a)]^{n(C_H)}, \quad (10)$$

де $A(C_H)$ та $n(C_H)$ — апроксимовані експериментально залежності від C_H (4) та (5), що враховують вплив водню на мікромеханізми руйнування (включаючи дифузію, локальну декогезію та пастковане накопичення [2–4, 7]). Поведінка параметрів росту тріщини у водневому середовищі також моделювалася в [13, 14].

Залишкову довговічність N_{fc} оцінюють інтегруванням від порогової до критичної глибини:

$$N_{fc} = \int_{a_{th}}^{a_{fc}} \frac{da}{A(C_H) [K_I(a)]^{n(C_H)}}, \quad (10)$$

Цей інтеграл виконується числово (наприклад, методом трапецій або Рунге–Кутта), з підстановкою експериментально апроксимованих функцій. Гладка поведінка підінтегрального виразу, разом із монотонним характером $K_I(a)$, забезпечує стабільність обчислень. Отримане значення N_{fc} дає кількісну оцінку кількості циклів навантаження до руйнування при заданій концентрації водню.

Вплив концентрації водню на параметри тріщиностійкості трубної сталі. Аналіз графіків (рис. 1) показав, що зі зростанням C_H порогові та критичні значення КІН знижуються експоненційно, що свідчить про зменшення опору матеріалу до втомного руйнування. Наприклад, ΔK_{fc} при переході від 0,074 до 5,462 ppm зменшується майже втричі (рис. 1b). Водночас ΔK_{th} демонструє подібну динаміку, що підтверджує зниження опору до ініціації тріщини (рис. 1a).

Коефіцієнт закону Паріса $A(C_H)$ зменшується у вигляді суми експонент (рис. 1c), відображаючи складну поведінку швидкості росту тріщин, зумовлену дифузією, локальною декогезією та пасткованим накопиченням водню. Показник $n(C_H)$ (рис. 1d) логарифмічно зростає, що вказує на підвищену чутливість швидкості росту тріщин до рівня навантаження в умовах наявності водню.

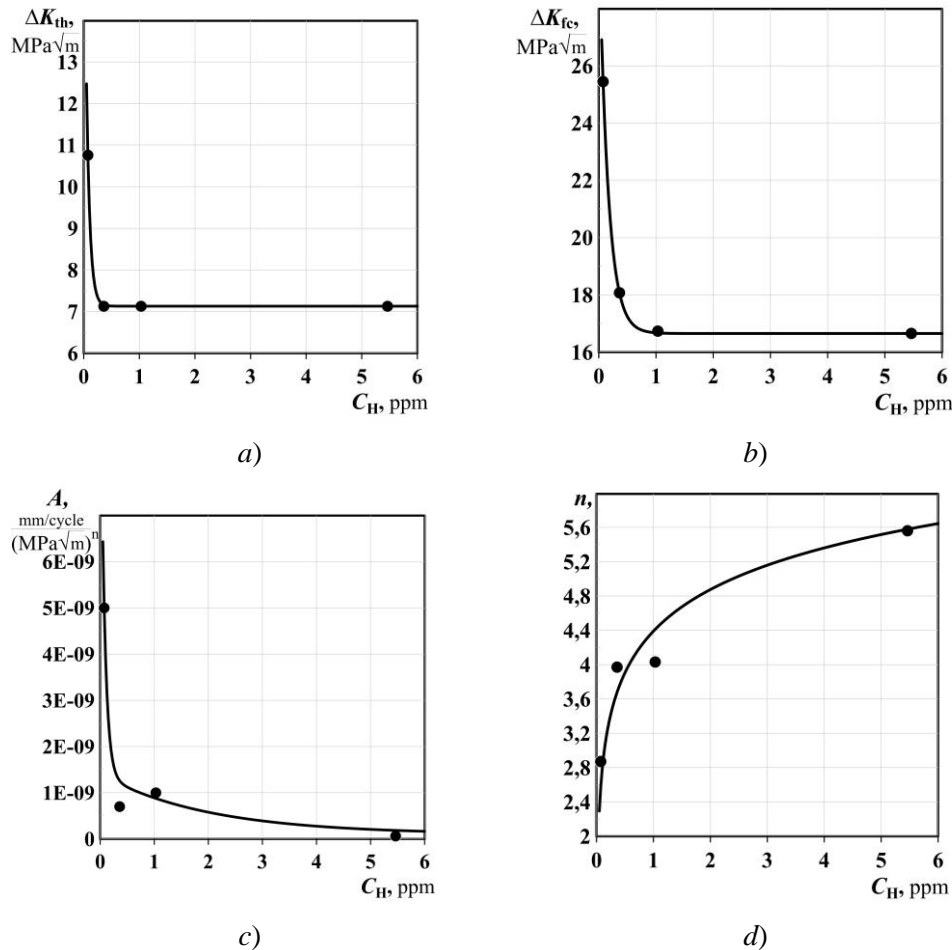


Рис. 1 Залежності тріщиностійкісних параметрів трубної сталі від сумарної концентрації водню в металі C_H :

a) пороговий розмах коефіцієнта інтенсивності напружень $\Delta K_{th}(C_H)$; *b)* критичний розмах $\Delta K_{fc}(C_H)$; *c)* коефіцієнт Паріса $A(C_H)$; *d)* показник степеневі залежності $n(C_H)$.

Символи – експериментальні дані, суцільні криві – аналітичні апроксимації.

Fig. 1. Dependence of fracture resistance parameters of pipeline steel on total hydrogen concentration in the metal C_H :

a) threshold stress intensity factor range $\Delta K_{th}(C_H)$; *b)* critical stress intensity factor range $\Delta K_{fc}(C_H)$; *c)* Paris law coefficient $A(C_H)$; *d)* Paris law exponent $n(C_H)$.

Symbols represent experimental data; solid curves denote analytical approximations.

На основі отриманих апроксимацій (2)–(5) побудовано графіки залежності порогового та критичного розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень (ΔK_{th} , ΔK_{fc}) та коефіцієнтів закону Паріса (A , n) від сумарної концентрації водню в металі C_H .

Отримані функціональні залежності є основою для подальшого чисельного оцінювання залишкової довговічності трубопроводів із дефектами, насичених воднем, без потреби у складному моделюванні.

Приклад оцінки залишкової довговічності трубного сегмента

Для демонстрації практичного застосування запропонованої моделі розглянемо сталеву трубу, яка експлуатується під внутрішнім тиском і має дефект у вигляді півеліптичної тріщини,

розташованої на внутрішній поверхні. Такий тип дефекту є типовим для трубопроводів, що працюють у водневовмісному середовищі. Особливості поширення тріщин у режимі гідродарів та під дією водню показано в [15, 16]. Схематичне зображення геометрії задачі наведено на **рис. 2**, де вказані основні розміри труби та параметри тріщини.

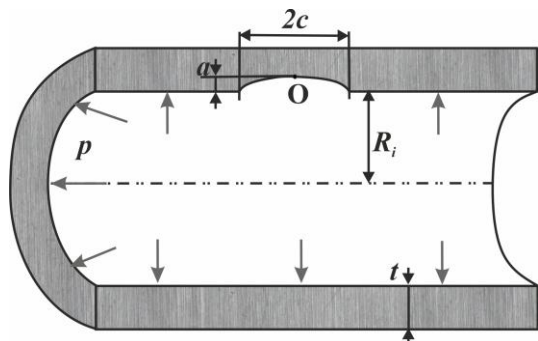


Рис. 2. Схематичне зображення трубного сегмента з півеліптичною тріщиною на внутрішній поверхні.

Fig. 2. Schematic representation of a pipe segment with a semi-elliptical crack on the inner surface.

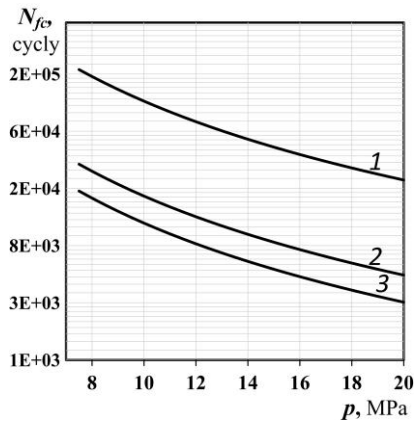
Умови розрахунку приймаються такими: зовнішній радіус труби $R_a=305$ мм, товщина стінки $t=11$ мм, отже внутрішній радіус $R_i=294$ мм. Робочий тиск становить $p=8$ МПа, тріщина має співвідношення півосей $a/c=0,5$ а сумарна концентрація водню в металі дорівнює $C_H=3$ ppm.

На першому етапі обчислюється мембранна напруга в стінці труби за формулою (6): $\sigma=213.8$ МПа.

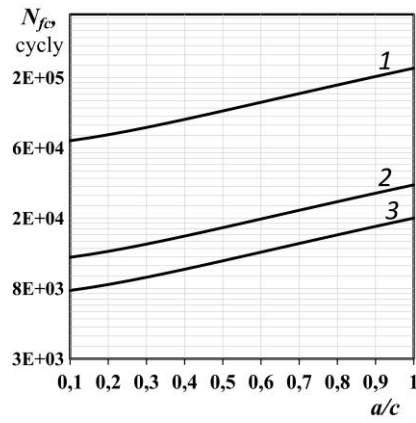
Далі, з використанням апроксимованих залежностей (2) - (5), визначаються характеристики тріщиностійкості при заданій концентрації водню: пороговий розмах коефіцієнта інтенсивності напружень $\Delta K_{th} \approx 7,3$ МПа \sqrt{m} (рис. 1 a), критичний розмах $\Delta K_{fc} \approx 16,65$ МПа \sqrt{m} (рис. 1 b), коефіцієнт Паріса $A \approx 3,9 \cdot 10^{-10}$ m/cycle (рис. 1 c), показник степеневі залежності $n \approx 5,2$ (рис. 1 d).

Ці значення є основою для подальшого розрахунку коефіцієнта інтенсивності напружень $K_I(a)$, який описує навантажуваний стан тріщини у вершині її глибини т.О. Для цього застосовується аналітична формула (7), в якій геометричний множник $F(a/c)$ визначається за співвідношенням (8). Розв'язуючи рівняння (9), чисельно знаходять порогову a_{th} та критичну a_{fc} глибини тріщини, що відповідають значенням ΔK_{th} та ΔK_{fc} при фіксованих параметрах труби й середовища.

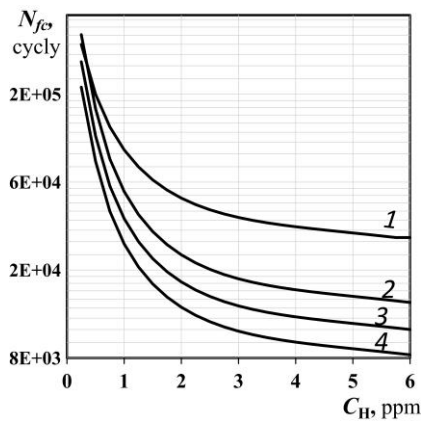
Після цього виконується чисельне інтегрування рівняння (10), що описує швидкість росту втомної тріщини. Для обчислення залишкової довговічності N_{fc} використовують метод трапецій у межах $a_{th} \leq a \leq a_{fc}$. Отримане значення $N_{fc} \approx 22600$ циклів вказує на кількість навантажувальних циклів до руйнування за заданих умов.



a)



b)



c)

Рис. 3. Залежність залишкової довговічності N_{fc} від: а, б) внутрішнього тиску p та співвідношення a/c при $C_H = 0,5$ (лінія 1); 2 (2); 5 (3) ppm; в) сумарної концентрації водню C_H при $a/c = 0,25$ (лінія 1); 0,5 (2); 0,75 (3); 1 (4).

Fig. 3. Dependence of residual fatigue life N_{fc} on: a, b) internal pressure p and aspect ratio a/c at $C_H = 0.5$ (curve 1); 2 (2); 5 (3) ppm; c) total hydrogen concentration C_H at $a/c = 0.25$ (curve 1); 0.5 (2); 0.75 (3); 1 (4).

Для детальнішого аналізу впливу окремих факторів проведено параметричне дослідження, результати якого подано на рис. 3. На рис. 3а зображено залежність залишкової довговічності N_{fc} від внутрішнього тиску p при трьох рівнях концентрації водню $C_H=0,5$; 2; 5 ppm. Як видно з графіка, підвищення тиску призводить до істотного зниження довговічності. Рисунок 3б ілюструє вплив співвідношення півосей тріщини a/c :

зі збільшенням цього параметра довговічність зростає, що свідчить про меншу небезпеку ширших і менш глибоких тріщин порівняно з вузькими та глибокими дефектами. На рис. 3в показано залежність N_{fc} від сумарної концентрації водню C_H при чотирьох фіксованих значеннях a/c . Результати демонструють, що найінтенсивніше зниження довговічності відбувається при зростанні концентрації до приблизно 1 ppm. Після цього вплив водню на ресурс зберігається, однак стає значно менш вираженим, що вказує на поступове наближення до області насичення.

Аналіз результатів свідчить про сильний вплив усіх трьох чинників – тиску, геометрії тріщини та концентрації водню – на залишкову довговічність. Запропонована модель дозволяє швидко оцінити безпечний термін експлуатації труби на основі ключових параметрів без потреби у числовому моделюванні напружено-деформованого стану.

ВИСНОВКИ

У роботі запропоновано теоретичну модель для оцінювання залишкової втомної довговічності труб із внутрішніми півеліптичними тріщинами, які експлуатуються в умовах водневовмісного

середовища. Модель враховує одночасний вплив внутрішнього тиску, геометрії дефекту та сумарної концентрації водню в металі. На основі експериментальних досліджень зразків із низьколегованої трубної сталі побудовано аналітичні апроксимації тріщиностійкісних параметрів – порогового та критичного розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень (ΔK_{th} , ΔK_{fc}), а також коефіцієнтів закону Паріса (A та n) – як функцій концентрації водню. Отримані залежності забезпечують високу відповідність експериментальним даним і дозволяють здійснювати розрахунок довговічності без застосування складного чисельного моделювання. Запропонована модель спирається на модифікований закон Паріса з урахуванням впливу водню на механізми руйнування та застосовує аналітичну формулу для визначення коефіцієнта інтенсивності напружень у півеліптичній тріщині. Параметричний аналіз показав, що найсильніший вплив на довговічність мають сумарна концентрація водню (особливо в діапазоні до 1 ppm), глибина тріщини (співвідношення a/c), а також рівень внутрішнього тиску. Запропонований підхід дозволяє інженерно ефективно оцінювати залишковий ресурс сталевих трубопроводів у водневому середовищі та може бути використаний у практиці діагностики та проектування водневих систем. Результати узгоджуються з попередніми підходами до прогнозування ресурсу водневочутливих конструкцій [17].

1. ASTM E647-15e1. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015. <https://doi.org/10.1520/E0647-15E01>
2. Gangloff R.P. Hydrogen-assisted cracking of high-strength alloys // *Comprehensive Structural Integrity*. – Vol. 6. – Elsevier, 2003. – P. 31–101.
3. Turnbull A., Carroll M.W., Ferriss D.H. Review of hydrogen transport and trapping in steels // *Corrosion Science*. – 2001. – Vol. 43, No. 5. – P. 871–896.
4. Olden V., Thaulow C., Johnsen R. Modelling of hydrogen diffusion and hydrogen induced cracking in supermartensitic and duplex stainless steels // *Materials and Design*. – 2008. – Vol. 29, No. 10. – P. 1934–1948.
5. Dmytrakh I., Syrotyuk A., Leshchak R. Specific effects of hydrogen concentration on resistance to fracture of ferrite-pearlitic pipeline steels // *Proc. Struct. Integrity*. – 2019. – Vol. 16. – P. 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.029>
6. Liu Q., Atrens A.D., Shi Z., Verbeken K., Atrens A. Determination of the hydrogen fugacity during electrolytic charging of steel // *Corrosion Science*. – 2014. – Vol. 87. – P. 239–258. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.06.033>
7. Mytsyk B., Hembara O., Shchepanskyi P. Determination of hydrogen diffusion coefficients in metals by the method of low mechanical stresses // *Arch. Appl. Mech.* – 2022. – Vol. 92, Is. 11. – P. 3203–3213. <https://doi.org/10.1007/s00419-022-02231-0>
8. Dutkiewicz M., Hembara O., Chepil O., Hrynenko M., Hembara T. A new energy approach to predicting fracture resistance in metals. *Materials*. 2023. Vol. 16, Is. 4. Art. no. 1566.
9. Dutkiewicz M., Hembara O., Ivanytskyi Y., Hvozdiuk M., Chepil O., Hrynenko M., Hembara N. Influence of hydrogen on the fracture resistance of pre-strained steam generator steel 22K. *Materials*. 2022. Vol. 15, Is. 19. Art. no. 6596.

10. Takayama K., Matsumoto R., Taketomi S., Miyazaki N. Hydrogen diffusion analyses of a cracked steel pipe under internal pressure. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011. Vol. 36, Is. 1. P. 1037–1045.
11. Hembara O., Syrotyuk A., Chepil O., Sapuzhak Y., Hembara N. Evaluation of increased local hydrogen concentration in the vicinity of various types of defects in low-alloyed steels // *Proc. Struct. Integrity*. – 2024. – Vol. 59. – P. 190–197. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.028>
12. Oriani R.A. Hydrogen embrittlement of steels // *Annual Review of Materials Science*. – 1978. – Vol. 8. – P. 327–357.
13. Lynch S.P. Hydrogen embrittlement phenomena and mechanisms // *Corrosion Reviews*. – 2012. – Vol. 30, No. 3–4. – P. 105–123.
14. *Influence of Corrosive Hydrogenating Media on the Residual Service Life of Structural Elements in the Maneuvering Mode of Operation* / O.E. Andreikiv, V.R. Skal's'kyi, I.Ya. Dolins'ka, A.R. Dzyubyk // *Materials Science*. – 2018. – **54**, No 1. – P. 61–68. DOI: 10.1007/s11003-018-0158-3.
15. *Computational model of the propagation of stress-corrosion cracks at high temperatures* / O.E. Andreikiv, I.Y. Dolins'ka, A.R. Lysyk, N.B. Sas // *Materials Science*. – 2017. – **52**, No 5. – P. 714–721. DOI: 10.1007/s11003-017-0014-x.
16. *Propagation of high-temperature creep cracks in metals under the influence of hydrogen and neutron irradiation* / O. Andreykiv, I. Dolinska, S. Nastasiak, O. Svirchevskyi // *Procedia Structural Integrity*. – 2024. – **59**. – P. 182–189. DOI: 10.1016/j.prostr.2024.04.027
17. Zhang W., Atrens A. A review of hydrogen-enhanced crack growth in pipeline steels // *Corrosion Reviews*. – 2013. – Vol. 31, No. 3–4. – P. 73–88.
18. *Residual Life Estimation Procedure for a Fatigue Crack-Containing Bogie Frame of the Electric Locomotive* / V.R. Skal's'kyi, D.V. Rudavs'kyi, R.Y. Yarema, I.Y. Dolins'ka, V.R. Bas, O.S. Dubyts'kyi // *Strength of Materials*. – 2016. – **48**, No 2. – P. 220–226. DOI: 10.1007/s11223-016-9758-z.

Analysis of the Residual Fatigue Life of Pipes with Internal Semi-Elliptical Cracks in a Hydrogen-Containing Environment

O.Ya. Chepil, I. M. Soviak, A.M. Syrotyuk

Дані про авторів:

ЧЕПІЛЬ Ольга Ярославівна (CHEPIL Olha)

- доктор технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник
- Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка (*Karpenko Physico-Mechanical Institute, National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine*);
- ад'юнкт

- Бидгощська політехніка, Бидгощ, Польща (*Bydgoszcz University of Sciences and Technology, Bydgoszcz, Poland*),
- кореспондуючий автор
- e-mail: oljach0409@gmail.com
- <https://orcid.org/0000-0003-4916-819X>

СОВ'ЯК Іванна Миколаївна (SOVIAK Ivanna)

- аспірант, молодший науковий співробітник
- Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка (*Karpenko Physico-Mechanical Institute, National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine*)
- викладач
- Львівський державний університет безпеки життєдіяльності (*Lviv state University of Life Safety, Lviv, Ukraine*)
- e-mail: ivannakohan2001@gmail.com
- <https://orcid.org/0000-0001-5742-9551>

СИРОТЮК Андрій Михайлович (SYROTYUK Andriy)

- доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник
- Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка (*Karpenko Physico-Mechanical Institute, National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine*)
- e-mail: syrotyuk@ipm.lviv.ua
- <https://orcid.org/0000-0002-9558-0153>