УДК 620.197.5:669.788

ОЦІНЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ КОНЦЕНТРАЦІЇ ВОДНЮ БІЛЯ ПІВЕЛІПТИЧНОЇ ТРІЩИНИ У ТРУБОПРОВОДІ

О.Я. ЧЕПІЛЬ[1,2], І.М. СОВ'ЯК[1,3], А.М. СИРОТЮК[1]

[1]Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів
[2]Bydgoszcz University of Science and Technology, Poland
[3]Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

Аналітично розраховано та оцінено локальний розподіл водню біля півеліптичної тріщини у трубопроводі. Методом скінченних елементів, проаналізовано дифузію водню з врахуванням напружено-деформованого стану матеріалу. Для коректного розрахунку гідростатичних напружень і розподілу концентрації водню побудовано 3D-модель труби з тріщиною. Деталізовано зону дефекту та виконано дискретизацію методом скінченних елементів. Обчислення проведено в ANSYS 2024R2. Показано, що максимальні концентрації водню спостерігаються у зонах підвищених гідростатичних напружень і пластичних деформацій, особливо у вершині тріщини. Аналіз впливу внутрішнього тиску та геометричних параметрів тріщини на розподіл водню показав, що зі збільшенням глибини дефекту зростає частка пасткованого водню, що підвищує ризик водневого окрихчення матеріалу. Отримані результати можуть бути використані для прогнозування довговічності трубопроводів та розробки методів запобігання їх деградації.

Ключові слова: *трубопровід; низьколегована сталь; водневе окрихчення; тріщиноподібні дефекти; метод скінченних елементів; напружено-деформований стан; гідростатичне напруження; пластична деформація; дифузія водню; пасткований водень.*

The local distribution of hydrogen near a semi-elliptical crack in a pipeline was analytically calculated and evaluated. Using the finite element method, hydrogen diffusion was analyzed, taking into account the material's stress-strain state. The local distribution of hydrogen near a semi-elliptical crack in a pipeline was analytically calculated and evaluated. Hydrogen diffusion was analyzed using the finite element method, considering the material's stress-strain state. To accurately calculate hydrostatic stresses and hydrogen concentration distribution, a 3D model of the pipe with a crack was developed. The defect zone was detailed and discretized using the finite element method. Calculations were performed in ANSYS 2024R2. It was shown that maximum hydrogen concentrations occur in areas of elevated hydrostatic stresses and plastic deformations, particularly at the crack tip. The analysis of the influence of internal pressure and crack geometry on hydrogen distribution revealed that with increasing defect depth, the proportion of trapped hydrogen increases, which raises the risk of hydrogen embrittlement. The obtained results can be used to predict the service life of pipelines and to develop methods for preventing their degradation.

Keywords: *pipeline; low-alloyed steel; hydrogen embrittlement; crack-like defects; finite element method; stress-strain state; hydrostatic stress, plastic deformation; hydrogen diffusion, trapped hydrogen.*

Вступ. Водень є перспективним екологічно чистим енергоносієм, проте його взаємодія з металами може спричинити деградацію матеріалів, що особливо важливо для сталевих трубопроводів [1, 2, 3]. Одним із головних механізмів деградації є водневе окрихчення (ВО), яке пов'язане з накопиченням водню в

зонах напруження, що підвищує крихкість матеріалу. На характер дифузії водню впливають такі чинники, як мікроструктура сплаву, температура, внутрішні дефекти та механічне навантаження [4, 5, 6, 7]. Під час пластичної деформації утворюються нові дислокації та вакансії, що діють як пастки для водню, сприяючи його локалізації.

Оцінка концентрації водню у зоні передруйнування вимагає врахування напружено-деформованого стану матеріалу. Дослідження підтверджують, що водень накопичується переважно у зонах максимальних гідростатичних напружень. Числові методи, зокрема метод скінченних елементів, активно застосовуються для вивчення поширення водню в матеріалі [8, 9], але універсального підходу для врахування всіх факторів досі не розроблено.

Серед основних механізмів ВО виділяють воднево-посилену пластичність (HELP) та воднево-індуковане крихке руйнування (HEDE). HELP домінує за низької концентрації водню, а HEDE – при високій [10, 11]. Важливу роль у ВО відіграє триосьовий напружений стан, який підсилює HELP через бічне зростання пор, спричинене воднем [12].

Феноменологічна модель дифузії водню. Водневе окрихчення моделюють у безперервному масштабі для врахування напружено-деформованого стану [8, 9]. Рівняння дифузії, що описують транспорт водню, базуються на феноменологічному підході, де векторні потоки та баланс маси визначаються в межах матеріалу .

Атоми водню сприяють роз’єднанню, змінюють рух дислокацій і впливають на матеріал. Напружено-деформований стан впливає на дифузію водню через два основні механізми: гідростатичне напруження – розширює кристалічну решітку, сприяючи зайняттю воднем розширених позицій; пластична деформація – збільшує кількість дефектів, створюючи пастки для водню [**Помилка! Джерело посилання не знайдено.**, **Помилка! Джерело посилання не знайдено.**].

Останній механізм критично важливий у вершині тріщини, де локалізується пластична деформація. Тому моделі дифузії водню враховують два основні хімічні стани:

- дифузійно-рухомий водень (L, lattice hydrogen): атоми водню, що перебувають у міжвузлях кристалічної решітки та здатні вільно дифундувати під дією концентраційних, напружених або електрохімічних градієнтів.
- пасткований водень (T, trapped hydrogen): атоми водню, що захоплюються локальними дефектами мікроструктури, такими як дислокації, вакансії, міжфазні межі або карбіди. Ці атоми мають обмежену рухливість та інші енергетичні характеристики вивільнення.

У моделях дифузії водню в металах враховують два типи вузлів: ґраткові (L), де атоми водню займають міжвузлові положення, і пастки (T), де водень затримується в дефектах матеріалу. Масові потоки в таких системах описуються рівняннями Онзагера [12, 15]. Хоча основною змінною є концентрація водню, рух атомів визначається градієнтами хімічного потенціалу, модель розрахунку наведена у [3]:

$$J_L = -D_{LL}\nabla C_L + \frac{D_{LL}}{RT} C_L \bar{V}_H \nabla \sigma_h \quad \text{та} \quad \mathrm{J_T} = 0 \tag{1}$$

Рівняння балансу набуває вигляду:

$$\frac{dC_L}{dt} + \frac{dC_T}{dt} + \nabla \cdot J_L = 0 \tag{2}$$

де J_i – потік водню, D_{LL} — кофіційнт дифузії дифузійно-рухомого водню, D_{TT} — коефіцієнт дифузії пасткованого водню ($D_{TT}\approx 0$, оскільки пастки не з'єднані між

собою), C_L та C_T — концентрації дифузійно-рухомого та пасткованого водню відповідно, R — універсальна газова стала, а T — абсолютна температура.

Додатково хімічний потенціал може бути виражений через концентрацію водню. Точніше, він пов'язаний із заповненням вузлів гратки чи пасток, $\theta_i=C_i/N_i$, де N_i — кількість вузлів гратки чи пасток.

Щоб зв’язати невідомі C_L і C_T, використовують кінетичні або термодинамічні припущення. У цій роботі рівновага розглядається між пастками

$$\frac{\theta_T}{1-\theta_T}=\frac{\theta_L}{1-\theta_L}K_T \tag{3}$$

та міжвузловими місцями, що описується рівнянням Оріані [2]:

де $K_T=\exp\left(\frac{-E_b}{RT}\right)$ а енергія зв’язку E_b є негативною [1] та визначається як різниця хімічних потенціалів $\mu_L^0-\mu_T^0$. Якщо термодинамічна рівновага не виконується, необхідно використовувати підхід запропонований в [16]. Припускаючи $\theta_L \ll 1$ концентрація пасток C_T через C_L виражається як:

$$C_T=N_T\Big/1+\frac{N_T}{C_L K_T} \tag{4}$$

Кількість пасток N_T, як було показано [4], залежить від пластичної деформації. Зміни C_T у часі мають враховувати швидкість утворення пасток. Таким чином, застосовуючи правило диференціювання складної функції:

$$\frac{dC_T}{dt}=\frac{dC_T}{dC_L}\frac{dC_L}{dt}+\frac{dC_T}{dN_T}\frac{dN_T}{de^p}\frac{de^p}{dt} \tag{5}$$

де e^p – еквівалентна пластична деформація, визначена через пластичну частину тензора швидкості деформації D_{ij}^p:

$$e^p=\int_0^t\sqrt{\frac{2}{3}D_{ij}^p D_{ij}^p}\,dt \tag{6}$$

Включаючи похідні з рівняння (17) та $dC_T / dN_T=\theta_T$:

$$\frac{dC_T}{dt}=\frac{C(1-\theta_T)}{C_L}\frac{dC_L}{dt}+\theta_T\frac{dN_T}{de^p}\frac{de^p}{dt} \tag{7}$$

Кількість пасток зростає зі збільшенням пластичної деформації через утворення дефектів кристалічної ґратки. Теоретично вираз важко визначити, тому зазвичай використовується апроксимація у вигляді $N_T=N_T(e^p)$ отримана за допомогою електрохімічного тесту проникності. Для багатьох вуглецевих і низьколегованих сталей, що мають ОЦК-решітку (структура α-заліза або фериту) застосовується залежність, отримана у [8]:

$$\log N_T=23.26-2.33\exp(-5.5e^p) \tag{8}$$

Дифузійна модель, запропонована у [1], з урахуванням члену швидкості пластичної деформації, представленого у [4], остаточно набуває вигляду:

$$\left(\frac{C(1-\theta_T)}{C_L}+\theta_T\frac{dN_T}{de^p}\frac{de^p}{dt}\right)\frac{dC_L}{dt}+\nabla\cdot\left(D_L\nabla C_L+\frac{D_L C_L\bar{V}_H}{RT}\nabla\sigma_h\right)=0 \tag{9}$$

Ефективний коефіцієнт дифузії можна визначити так:

$$D_{\text{eff}} \frac{dC_L}{dt} + \theta_T \frac{dN_T}{de^p} \frac{de^p}{dt} - \nabla \cdot \left(D_L \nabla C_L + \frac{D_L C_L \bar{V}_H}{RT} \nabla \sigma_h \right) = 0 \qquad (10)$$

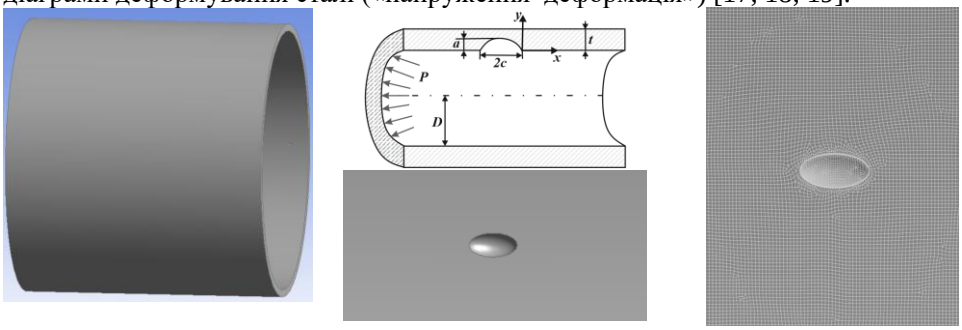
Аналіз розподілу водню в околі дефектів трубопроводу

Виконано аналітичні розрахунки та оцінку локального розподілу водню поблизу тріщини у трубопроводі. Проаналізовано дифузію водню в трубопроводі з низьколегованої сталі, що експлуатується під внутрішнім тиском воденьвмісного середовища. Труба має внутрішній діаметр *D* і товщину стінки *t*.

На її внутрішній поверхні розглянуто півеліптичну тріщину з відношенням глибини до півдовжини *a*/*c*=0.5 (рис. 1). Для оцінки впливу навантаження проведено розрахунки при чотирьох рівнів внутрішнього тиску: 7, 10, 20 та 30 MPa. Оскільки трубопровід тривалий час перебуває в експлуатації, досліджено стаціонарний розподіл водню.

Для коректного розрахунку гідростатичних напружень і розподілу концентрації водню побудовано 3D-модель труби з тріщиною (рис. 1a). Деталізовано зону дефекту (рис. 1b) та виконано дискретизацію методом скінченних елементів (рис. 1c). Обчислення проведено в ANSYS 2024R2.

Розрахункова модель містить 104328 скінченних елементів паралелепіпедо подібної форми та 227 446 вузлів. Для достовірного визначення гідростатичного напруження та деформацій пластичності використано експериментальні істинні діаграми деформування сталі («напруження–деформація») [17, 18, 19].



a) b) c)

Рис. 1. 3D-модель труби з півеліптичною тріщиною (*a*/*c* = 0.5): (a) загальний вигляд, (b) локалізація тріщини, (c) сітка скінченних елементів

Fig. 1. 3D model of a pipe with a semi-elliptical crack (*a*/*c* = 0.5): (a) general view, (b) crack localization, (c) finite elements mesh

Аналіз напружено-деформованого стану та вплив внутрішнього тиску на концентрацію водню. Використовуючи розроблену модель, досліджено вплив внутрішнього тиску на концентрацію дифузійно-рухомого та пасткованого водню в околі півеліптичної тріщини з відношенням глибини до півдовжини *a*/*c*=0.5. Дослідження проведено для тиску 20 MPa із використанням методу скінченних елементів, що дозволило визначити гідростатичні напруження, пластичні деформації та особливості накопичення водню в матеріалі.

Отримано розподіл гідростатичних напружень σ_h і еквівалентної пластичної деформації ε_p, які представлені на рис. 2.

Аналіз результатів (рис. 2a) показав, що максимальні значення σ_h локалізуються у вершині тріщини та різко зменшуються у напрямку основного матеріалу. Це вказує на високу концентрацію напружень у цій зоні, що сприяє накопиченню водню та може призводити до водневої деградації матеріалу.

На графіку (рис. 2b) представлено розподіл еквівалентної пластичної деформації ε_p, яка також досягає максимальних значень у вершині тріщини. Відомо, що водень накопичується у місцях значних пластичних деформацій, тому зона поблизу вершини тріщини є критичною для процесу пасткування водню.

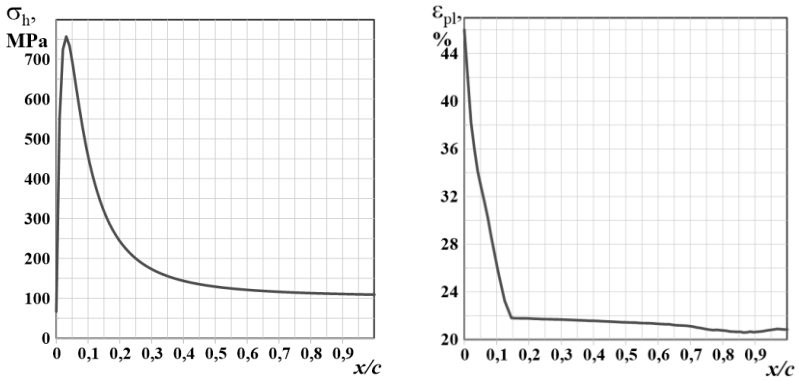


Рис. 2. Розподіл гідростатичних напружень (a) і пластичних деформацій (b) в околі півеліптичної тріщини.

Fig. 2. Distribution of hydrostatic stress (a) and plastic strain (b) around the semi-elliptical crack.

Розрахунок загальної концентрації водню та його розподіл у зоні тріщини. Визначення розподілу концентрації водню в околі тріщини є ключовим етапом оцінки впливу водню на матеріал труби. У даному дослідженні використовувалися чисельні методи для обчислення концентрації дифузійно-рухомого водню C_L та концентрації пасткованого водню C_T з урахуванням напружено-деформованого стану.

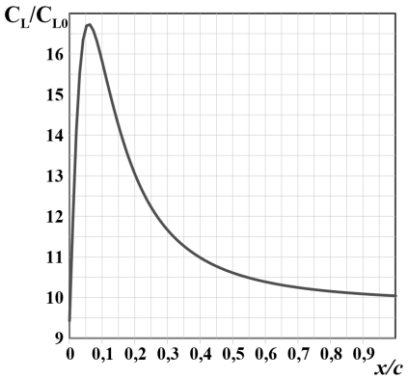
Концентрацію C_L отримано шляхом розв'язку рівняння Фіка, яке описує дифузію водню в матеріалі, із застосуванням раніше розроблених моделей [**Помилка! Джерело посилання не знайдено.**].

Концентрація C_T визначена відповідно до моделі, представленої у цій роботі, які враховують зв'язок між пластичною деформацією та пасткуванням водню. Оскільки водень має схильність до накопичення в місцях високих пластичних деформацій, концентрація C_T є найбільшою у зоні вершини тріщини.

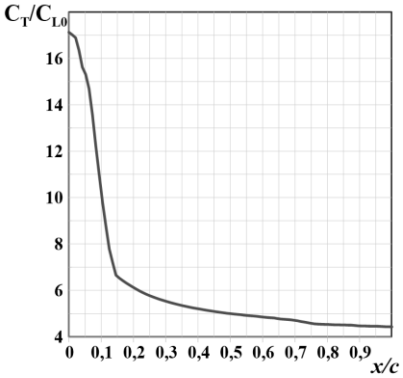
Сумарна концентрація водню в матеріалі визначається як: $C_{tot}=C_L+C_T$.

На рис. 3 представлено нормований розподіл концентрації водню, що дозволяє порівняти локальну концентрацію з початковою C_{L0}. Відповідно до літературних даних [19], початкова концентрація дифузійно-рухомого водню у сталі труби становить 2.08×10^{21} m^{-3} або 4.42×10^{-4} ppm.

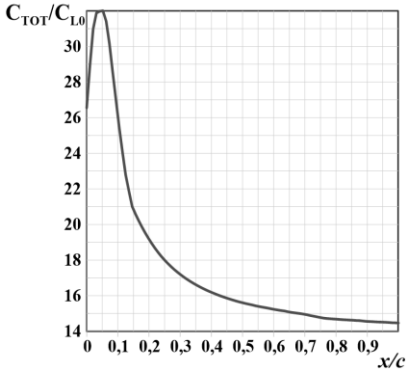
Результати (рис. 3) показують, що розподіл водню значною мірою залежить від гідростатичних напружень і пластичної деформації. У зоні підвищених напружень спостерігається накопичення C_L, тоді як у місцях значних пластичних деформацій концентрація C_T.



a)



b)



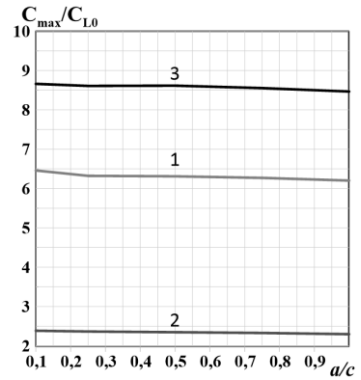
c)

Рис. 3. Нормований розподіл концентрації водню в околі півеліптичної тріщини: (a) концентрація дифузійно-рухомого водню, (b) концентрація пасткованого водню, (c) загальна концентрація водню.

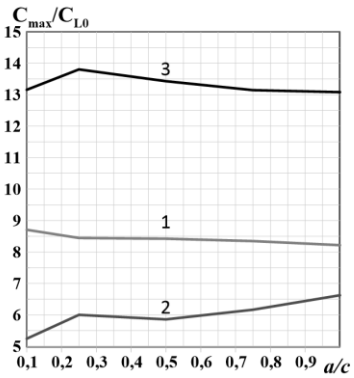
Fig. 3. Normalized distribution of hydrogen concentration around the semi-elliptical crack: (a) diffusible hydrogen concentration, (b) trapped hydrogen concentration, (c) total hydrogen concentration.

Аналіз впливу розмірів тріщини на максимальні значення концентрації водню. Для оцінки впливу геометричних параметрів тріщини на розподіл водню в матеріалі було проведено серію розрахунків для різних значень відношення глибини до півдовжини тріщини *a*/*c*. Аналіз виконано для чотирьох рівнів внутрішнього тиску: 7, 10, 20 та 30 МПа.

Розрахунки дозволили визначити максимальні значення концентрації дифузійно-рухомого водню (C_L), пасткованого водню (C_T) та загальної концентрації водню (C_{tot}) для кожного випадку. Отримані залежності представлені на рис. 4, де наведено результати для різних рівнів внутрішнього тиску.



a)



b)

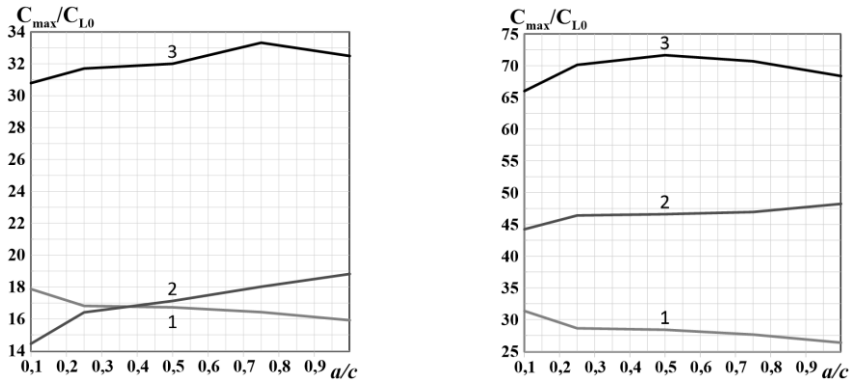


Рис. 4. Вплив відносної глибини тріщини (*a*/*c*) на максимальні значення концентрації водню при різних рівнях внутрішнього тиску: (a) 7 MPa, (b) 10 MPa, (c) 20 MPa, (d) 30 MPa. Лінія 1 – дифузійно-рухомий водень, лінія 2 – пасткований водень, лінія 3 – загальна концентрація водню.

Fig. 4. Influence of the relative crack depth (*a*/*c*) on the maximum hydrogen concentration at different internal pressure levels: (a) 7 MPa, (b) 10 MPa, (c) 20 MPa, (d) 30 MPa. Line 1 – diffusible hydrogen, line 2 – trapped hydrogen, line 3 – total hydrogen concentration.

Методом скінченних елементів було обчислено розподіл гідростатичних напружень і пластичних деформацій у зоні дефекту, що дозволило встановити взаємозв'язок між напруженим станом і концентрацією водню. Визначено, що зі збільшенням *a*/*c* змінюється не лише локальна концентрація водню, але й співвідношення між дифузійно-рухомими і пастковаными компонентами.

Аналіз результатів (рис. 4) показав, що для малих значень *a*/*c* (поверхневі тріщини) основна частка водню знаходиться у дифузійно-рухомому стані, тоді як для більших значень *a*/*c* (глибші тріщини) зростає частка пасткованого водню через збільшення пластичної зони у вершині тріщини.

Порівняння результатів для різних рівнів внутрішнього тиску дозволило оцінити його вплив на локальне накопичення водню. Було встановлено, що підвищення тиску призводить до зростання всіх компонентів концентрації водню, що пояснюється збільшенням гідростатичних напружень у матеріалі.

Висновки. Дослідження показало, що максимальні концентрації водню спостерігаються в зонах підвищених гідростатичних напружень і пластичних деформацій, зокрема у вершині тріщини [19]. Це сприяє локальному накопиченню водню та може призводити до водневої деградації матеріалу.

Використання методу скінченних елементів дозволило отримати розподіл дифузійно-рухомого (C_L) та пасткованого (C_T) водню у низьколегованій сталі. Виявлено, що найбільша кількість пасткованого водню накопичується в областях із значними пластичними деформаціями.

Підвищення внутрішнього тиску трубопроводу призводить до збільшення концентрації водню у матеріалі. Це пояснюється зростанням гідростатичних напружень, що посилює механізми накопичення водню у критичних зонах.

Глибші тріщини (вищі значення *a*/*c*) сприяють збільшенню пасткованого водню через розширення пластичної зони. Для малих значень *a*/*c* більша частка водню залишається в дифузійно-рухомому стані.

Отримані результати можуть бути використані для прогнозування терміну служби трубопроводів, що експлуатуються у воденьвмісному середовищі [17, 18,

19]. Запропоновані методики дозволяють оцінити ризик водневого окрихчення та визначити критичні області для профілактичного обстеження та ремонту.

1. *Sofronis P., McMeeking R.M.* Numerical analysis of hydrogen transport near a blunting crack tip // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 1989. – **37**, Is. 3. – P. 317–350. https://doi.org/10.1016/0022-5096(89)90002-1
2. *Oriani R.A.* The diffusion and trapping of hydrogen in steel // Acta Metallurgica. – 1970. – **18**, Is. 1. – P. 147–157. https://doi.org/10.1016/0001-6160(70)90078-7
3. *Díaz A., Alegre J.M., Cuesta I.I.* Coupled hydrogen diffusion simulation using a heat transfer analogy // International Journal of Mechanical Sciences. – 2016. – **115–116**. – P. 360–369. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.07.020
4. *Krom A.H.M., Koers R.W.J., Bakker A.* Hydrogen transport near a blunting crack tip // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 1999. – **47**, Is. 4. – P. 971–992. https://doi.org/10.1016/S0022-5096(98)00064-7
5. *Dmytrakh I., Syrotyuk A., Leshchak R.* Specific effects of hydrogen concentration on resistance to fracture of ferrite-pearlitic pipeline steels // Procedia Structural Integrity. – 2019. – Vol. 16. – P. 113–120. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.07.029.
6. *Skalskyi V., Andreikiv O., Dolinska I.* Assessment of subcritical crack growth in hydrogen-containing environment by the parameters of acoustic emission signals // International Journal of Hydrogen Energy. – 2018. – **43**, Is. 10. – P. 5217–5224. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.124
7. *Birnbaum H.K., Sofronis P.* Hydrogen-enhanced localized plasticity—a mechanism for hydrogen-related fracture // Materials Science and Engineering: A. – 1994. – **176**, Iss. 1–2. – P. 191–202. https://doi.org/10.1016/0921-5093(94)90975-X
8. *Kumnick A.J., Johnson H.H.* Deep trapping states for hydrogen in deformed iron // Acta Metallurgica. – 1980. – 28, Is. 1. – P. 33–39. https://doi.org/10.1016/0001-6160(80)90038-3
9. *Determination* of the hydrogen fugacity during electrolytic charging of steel / Q. Liu, A.D. Atrens, Z. Shi, K. Verbeken, A. Atrens // Corrosion Science. – 2014. – **87**. – P. 239–258. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.06.033
10. *Hutchinson J.W.* Plasticity at the micron scale // International Journal of Solids and Structures. – 2000. – **37**, Iss. 1–2. – P. 225–238. https://doi.org/10.1016/S0020-7683(99)00090-6
11. *Fleck N.A., Hutchinson J.W.* A phenomenological theory for strain gradient effects in plasticity // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 1993. – **41**, Is. 12. – P. 1825–1857. https://doi.org/10.1016/0022-5096(93)90072-N
12. *Andreykiv O.Y., Dolinska I.Y.* Mathematical modeling of growth of stress-corrosion cracks in an oil pipeline with regard for hydroshocks and in-service changes in the characteristics of its material // Journal of Mathematical Sciences (United States). – 2024. – **278**, Is. 5. – P. 908–917. https://doi.org/10.1007/s10958-024-06968-7
13. *Mytsyk B., Hembara O., Shchepanskyi P.* Determination of hydrogen diffusion coefficients in metals by the method of low mechanical stresses // Archive of Applied Mechanics. – 2022. – **92**, Is. 11. – P. 3203–3213. https://doi.org/10.1007/s00419-022-02231-0
14. *Onsager L.* Reciprocal relations in irreversible processes. I. // Physical Review. – 1931. – **37**, Is. 4. – P. 405–426. https://doi.org/10.1103/PhysRev.37.405
15. *Nagumo M.* Fundamentals of Hydrogen Embrittlement. – Singapore: Springer, 2016. – 239 p. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0161-1
16. *McNabb A., Foster P.K.* A new analysis of the diffusion of hydrogen in iron and ferritic steels // Transactions of the Metallurgical Society of AIME. – 1963. – **227**. – P. 618–627.
17. *A new* energy approach to predicting fracture resistance in metals / M. Dutkiewicz, O. Hembara, O. Chepil, M. Hrynenko, T. Hembara // Materials. – 2023. – **16**, Is. 4. – Art. no. 1566. https://doi.org/10.3390/ma16041566
18. *Influence* of hydrogen on the fracture resistance of pre-strained steam generator steel 22K / M. Dutkiewicz, O. Hembara, Y. Ivanytskyi, M. Hvozdiuk, O. Chepil, M. Hrynenko, N. Hembara // Materials. – 2022. – **15**, Is. 19. – Art. no. 6596. https://doi.org/10.3390/ma15196596
19. *Evaluation* of increased local hydrogen concentration in the vicinity of various types of defects in low-alloyed steels / O. Hembara, A. Syrotyuk, O. Chepil, Y. Sapuzhak, N. Hembara// Procedia Structural Integrity. – 2024. – **59**. – P. 190–197. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.028

20. *Song W.-G.*, *Hembara O.V.*, *Sapuzhak Y.I.* Mathematical modeling of the influence of hydrogen on the corrosion activity of metal structures // Materials Science. – 2020. – **56**, No. 1. – P. 66–74. https://doi.org/10.1007/s11003-020-00398-x

Evaluation of Hydrogen Concentration Distribution Near a Semi-Elliptical Crack in a Pipeline

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