

УДК 620.197.5:669.788

ОЦІНЮВАННЯ ПІДВИЩЕНОЇ ЛОКАЛЬНОЇ КОНЦЕНТРАЦІЇ ПАСТКОВАНОГО ВОДНЮ

О. В. ГЕМБАРА^{1,2}, О. Я. ЧЕПІЛЬ^{2,3}, Н. Т. ГЕМБАРА², Я. І. САПУЖАК²

¹ Національний університет "Львівська політехніка";

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

³ Bydgoszcz University of Science and Technology, Poland

Розроблено математичні моделі наводнення низьколегованих сталей, за допомогою яких можна оцінювати підвищену локальну концентрацію водню в околі дефектів різного типу. Встановлено аналітичні залежності та виконано розрахункові оцінювання локального розподілу пасткового водню в околі пустот різної форми та тріщиноподібних дефектів на внутрішній поверхні трубопроводу із низьколегованої сталі залежно від внутрішнього тиску водневовмісного середовища.

Ключові слова: локальна концентрація водню, дифузійно-рухомий водень, пасткований водень, пластична деформація.

Mathematical models of hydrogenation of low-alloy steels, enabling the assessment of increased local hydrogen concentration near defects of various types were developed. Analytical dependences were established, and computational evaluations of the local distribution of trapped hydrogen near voids of different shapes and crack-like defects on the internal surface of a pipeline made of low-alloy steel were performed, depending on the internal pressure of the hydrogen-containing environment.

Keywords: local hydrogen concentration, diffusible hydrogen, trapped hydrogen, plastic deformation.

Вступ. Дифузія водню у металі залежить від низки чинників, зокрема від структури матеріалу, температури, внутрішніх дефектів та стану деформації. Під час механічного навантаження водень може накопичуватися в зонах напруження, особливо поблизу дислокацій і тріщин, що підвищує ризик крихкого руйнування. Пружнопластична деформація впливає на рух водню внаслідок формування нових дефектів у кристалічній ґратці, наприклад, дислокацій та вакансій. Ці дефекти є пастками для атомів водню, що знижує його рухливість та сприяє локалізації, яка може призвести до концентрації водню в критичних зонах [1–8]. Проблема оцінювання концентрації водню біля різних дефектів у деформованому та наводненому тілі є складною і ефективного аналітичного її розв’язку в літературі ще не опубліковано. У світовій науці активно розвивають числові методи для оцінки концентрації водню в металах, зокрема, у зоні передруйнування, в якій матеріал деформований за границю плинності. Багато авторів [9–19], застосовуючи метод скінченних елементів, досліджували вплив напружено-деформованого стану на розподіл водню у зоні передруйнування для конкретних випадків. Узагальнений розв’язок задачі дифузії в полі напружень, який давав би можливість для довільного матеріалу у довільній точці в зоні передруйнування оцінити концентрацію водню, на сьогодні відсутній.

Щоб коректно визначити концентрацію водню у зоні передруйнування, необхідно враховувати напружено-деформований стан у вершині тріщини. Вста-

Контактна особа: О. Я. ЧЕПІЛЬ, e-mail: oljach0409@gmail.com

новлено [9, 11, 15], що найбільше водню накопичується в об'ємах, де гідростатичні напруження досягають максимуму.

Формулювання задачі дифузії водню методом скінченних елементів. Рівняння дифузії водню, яке тут використовуємо, базується на результатах праць [11, 12, 16, 20–24]. Деталі скінченно-елементного формулювання рівняння дифузії водню наведено в літературі [10, 11, 16].

Відповідно до положення атомів водню у металах, класифікують два його типи: атоми водню в нормальних міжвузлових ділянках ґратки (дифузійно-рухомий або ґратковий водень) та в місцях захоплення (пасткований). Концентрацію дифузійно-рухомого та пасткованого водню позначають відповідно C_L та C_T . Згідно з експериментальними результатами [25], концентрація пасткованого водню C_T пов'язана з еквівалентною пластичною деформацією ϵ_p . Враховуючи рівноважний зв'язок між дифузійно-рухомим та пасткованим воднем і теорію Оріані [26], концентрація C_T пов'язана з C_L . Потік водню J зумовлений не тільки градієнтом концентрації водню C_L , але також градієнтом гідростатичного напруження σ_h , і визначають його так:

$$J = -D_L \nabla C_L + \frac{D_L C_L V_H}{RT} \nabla \sigma_h, \quad (1)$$

де D_L – коефіцієнт дифузії водню у вузлах ґратки, V_H – молярний об'єм водню, R – газова стала (8,314 J/(mol·K)), T – абсолютна температура. З огляду на це, рівняння дифузії водню запишемо так:

$$D^* \frac{\partial C_L}{\partial t} - \nabla (D_L \nabla C_L) + \nabla \left(\frac{D_L C_L V_H}{RT} \nabla \sigma_h \right) + \theta_T \frac{\partial N_T}{\partial \epsilon_p} \frac{\partial \epsilon_p}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

де θ_T – міра заповнення пасток водню, N_T – кількість пасток захоплення водню, а D^* – ефективний коефіцієнт дифузії, який залежить від C_L , C_T і θ_T :

$$D^* = \frac{C_L + C_T (1 - \theta_T)}{C_L}. \quad (3)$$

Застосовуючи стандартну скінченно-елементну процедуру з використанням методу Галеркіна, можна отримати скінченно-елементне рівняння дифузії водню з невідомим вектором для концентрації водню у вузлах $\{C_L\}$ у вигляді [10]

$$[M] \frac{\partial \{C_L\}}{\partial t} + ([K_1] + [K_2]) \{C_L\} = \{F_1\} + \{F_2\}, \quad (4)$$

де відповідні матриці та вектори обчислюємо за співвідношеннями

$$[M] = \int_V [N]^T D^* [N] dV, \quad (5)$$

$$[K_1] = \int_V [B]^T D_L [B] dV, \quad (6)$$

$$[K_2] = - \int_V [B]^T \frac{D_L V_H}{RT} [B] \{\sigma_h\} [N] dV, \quad (7)$$

$$\{F_1\} = - \int_S [N]^T \{\phi\} dS, \quad (8)$$

$$\{F_2\} = - \int_S [N]^T \{\theta_T\} \frac{\partial N_T}{\partial \epsilon_p} \frac{\partial \epsilon_p}{\partial t} dV. \quad (9)$$

У цих рівняннях $[N]$ – це функція форми скінченного елемента, $[B]$ – градієнт $[N]$, тобто $|B| = \nabla|N|$, а $\{\phi\}$ – вектор потоку водню на поверхні з нормаллю n , $\phi = j \cdot n$, $\{\sigma_h\}$ – вектор вузлового гідростатичного напруження.

Для дискретизації похідної за часом $\{C_L\}$ у рівнянні (4) використовували обернений метод Ейлера.

Для розв'язування рівняння дифузії (4) попередньо необхідно визначити поля напружень і деформацій в околі дефекту. Згідно із літературними результатами [20], вплив водню на границю плинності σ_{YS} описують так:

$$\sigma_{YS}(\epsilon_p, c) = (\xi \cdot c + 1) \sigma_0 \cdot (1 + \epsilon_p / \epsilon_0)^m, \quad (10)$$

де σ_0 – границя плинності за відсутності дії водню (або на повітрі), c – загальна концентрація водню, ϵ_0 – деформація, яка відповідає границі плинності за відсутності дії водню, m – параметр зміцнення, ξ – параметр зв'язку, який вказує на вплив водню на границю плинності. Розм'якшення, викликане воднем, відбувається за $\xi > 0$, а зміцнення за $\xi < 0$.

Для оцінювання впливу пластичної деформації ϵ_p на кількість місць захоплення N_T використали таку залежність [13]:

$$\log_{10} N_T = 23,26 - 2,33 \exp(-5,5 \epsilon_p). \quad (11)$$

Концентрацію пасткованого водню як функцію концентрації дифузійно-рухомого водню за припущенням зайнятості вузлів ґратки $\theta_L \ll 1$ подано у праці [20]:

$$C_T = \frac{N_T K_T C_L}{K_T C_L + N_L}, \quad (12)$$

де K_T є константою рівноваги, яка залежить від енергії зв'язку пастки W_B , температури T і газової константи R так:

$$K_T = \exp\left(-\frac{W_B}{RT}\right). \quad (13)$$

Встановлення аналітичних залежностей та розрахункові оцінки локального розподілу водню в околі пустот різної форми та мікро- і макротріщин. Проаналізували дифузію водню для труби, виготовленої з низьколегованої сталі типу AISI 1020, яка є під дією внутрішнього тиску транспортованого воденьвмісного продукту. Труба має внутрішній діаметр $R_i = 610$ mm і товщину $h = 11$ mm. На внутрішній поверхні труби допускаємо існування тріщиноподібного дефекту з початковими глибиною a та довжиною $2c$ (рис. 1a).

Розглянуто 5 типів тріщиноподібних дефектів на внутрішній поверхні труби: півколова ($a/c = 1$), півеліптичні ($a/c = 0,25; 0,5; 0,75$) та видовжена тріщини ($a/c = 0,1$). Враховуючи, що трубопроводи у водневій енергетиці повинні витримувати високі внутрішні тиски, вибрали чотири максимальні навантаження, тобто розраховували для внутрішніх тисків 7, 10, 20, 30 МПа.

Оскільки трубопроводи тривало експлуатували для транспортування воденьвмісного продукту з внутрішнім тиском, то з часом встановлюється стаціонарний розподіл водню. Тому досліджували концентрацію водню в рівноважному стаціонарному стані.

Для коректного визначення гідростатичних напружень та розподілу концентрації водню в околі тріщиноподібних дефектів розглянули лінійну ділянку труби з дефектом. Обчислювали за допомогою програми ANSYS 2022R1. З огляду

на симетричність конструкційного елемента та прикладеного навантаження, трубу обмежили двома площинами, які проходять через її діаметр, утворюючи в перетині кут 30° . Тобто, врахувавши умови симетрії стосовно утворених площин, за розрахункову модель прийняли фрагмент труби із градусною мірою дуги в 30° в центрі якого є тріщина. Його розбили на 76601 скінченний елемент тетраїдоподібної форми, використавши 123245 вузлових точок (рис. 1b). Для достовірного визначення розподілу гідростатичного напруження як характеристику матеріалу використовували експериментально побудовані істинні діаграми напруження–деформація сталі AISI 1020 [27, 28].

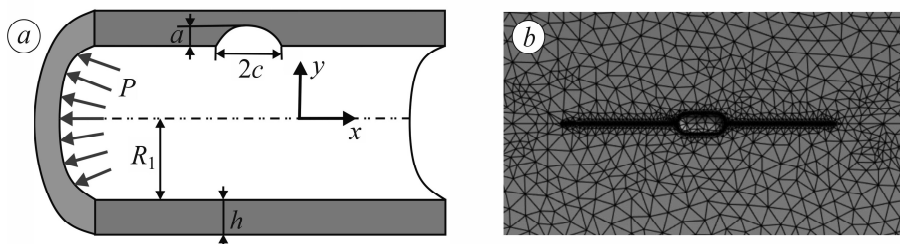


Рис. 1. Схематичне зображення геометрії труби з тріщиною (a) та її розбиття на скінченні елементи (b).

Fig. 1. Schematic representation of the geometry of a pipe with a crack and its finite element meshing (b).

Для аналізу дифузії водню розглянули крайові умови на поверхні дефекту за заданої концентрації водню C_B , яку можна визначити, використовуючи летучість газоподібного водню [29]

$$C_B = k \sqrt{p \cdot \exp \left(p \left(\frac{z_1}{T} + z_2 \right) \right)}, \quad (14)$$

де z_1 і z_2 – константи, T – абсолютна температура і k – розчинність, яку визначають з формули Арреніуса:

$$k = k_0 \exp \left(-\frac{\Delta H_s}{RT} \right). \quad (15)$$

Тут k_0 – передекспоненціальний чинник розчинності, ΔH_s – ентальпія розчину.

Для визначення концентрації в рівноважному стаціонарному стані знехтували, як і в праці [29], залежністю від пластичної деформації (четвертий доданок) в рівнянні (2). Отримали стаціонарне рівняння дифузії водню:

$$\nabla \left(\frac{D_L C_L V_H}{RT} \nabla \sigma_h \right) = \nabla (D_L \nabla C_L). \quad (16)$$

Проінтегрувавши рівняння (16), отримали:

$$\frac{V_H}{RT} \sigma_h = \ln \left(\frac{C_L}{C_B} \right) + \text{const}. \quad (17)$$

Підставивши значення V_H , R і T , остаточно одержали співвідношення з рівняння (2), нехтуючи попередньою пластичною деформацією, для визначення концентрації дифузійного водню залежно від гідростатичного напруження в околі тріщиноподібного дефекту:

$$\ln (C_L / C_B) = 8,21 \cdot 10^{-4} \sigma_h - \text{const}. \quad (18)$$

Вплив внутрішнього тиску газу та тріщиноподібних дефектів на концентрацію дифузійно-рухомого водню в ґратці. Раніше [30] проаналізовано дифузію водню для сталевих труб з п'ятьма типами тріщиноподібних дефектів на внутрішній поверхні за внутрішнього тиску. Використовували метод скінченних елементів для аналізу як дифузії водню, так і напружено-деформованого стану. Отримали розподіли концентрації водню в околі дефектів, змінюючи внутрішній тиск та глибину тріщини.

Встановлено, що в околі видовженої тріщини ($a/c = 0,1$) є вдвічі більша концентрація дифузійно-рухомого водню, ніж в околі півколової ($a/c = 1$) за тиску 7 МПа та на 15% – за тиску 30 МПа.

Максимальні значення гідростатичних напружень для видовженої тріщини ($a/c = 0,1$) на 20% переважають значення для півколової ($a/c = 1$) незалежно від тиску.

За зміни форми тріщини від півколової до півеліптичної ($a/c = 0,25$) максимальне значення концентрації водню збільшується на 4% за тиску 7 МПа, на 6% за тиску 10 МПа, на 11% за тиску 20 МПа та на 16% за тиску 30 МПа.

З підвищенням тиску від 7 до 30 МПа максимальне значення концентрації водню збільшується на 47% для півколової тріщини $a/c = 1$; на 49% для $a/c = 0,75$, на 50% для $a/c = 0,5$ і на 54,5% для $a/c = 0,1$.

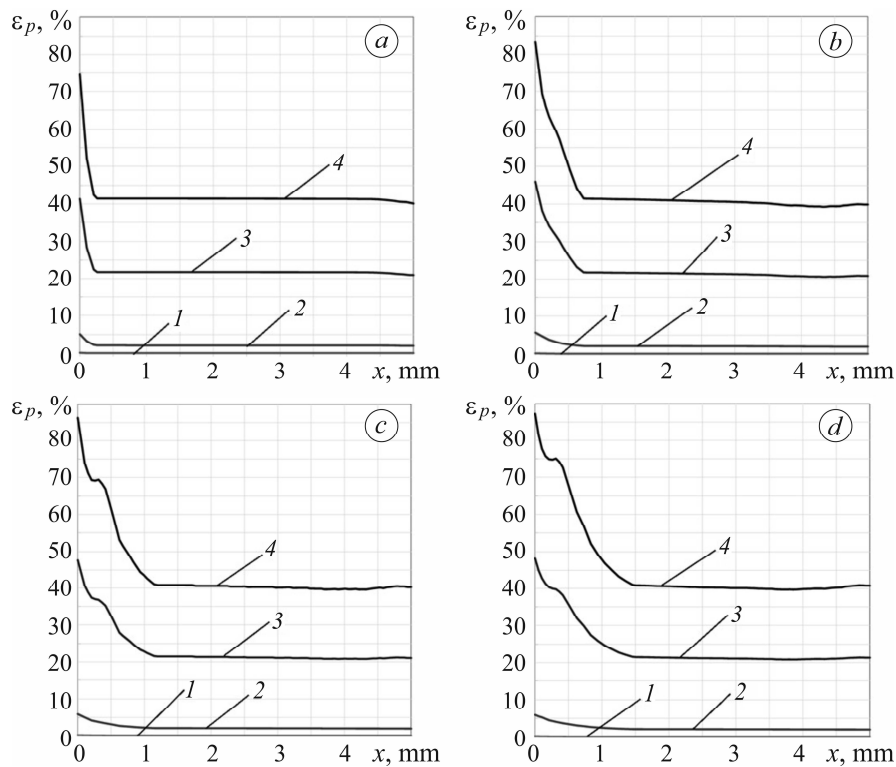


Рис. 2. Розподіл пластичної деформації вздовж осі Ox від поверхні дефекту за різних внутрішніх тисків та типів тріщиноподібних дефектів ($a - a/c = 0,1$; $b - 0,5$; $c - 0,75$; $d - 1$): 1 – 7 МПа; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 30 МПа.

Fig. 2. Distribution of plastic deformation along the Ox axis from the surface of the defect under different values of internal pressure for various types of crack-like defects ($a - a/c = 0,1$; $b - 0,5$; $c - 0,75$; $d - 1$): 1 – 7 МПа; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 30 МПа.

Вплив внутрішнього тиску газу та типу тріщиноподібних дефектів на концентрацію пасткованого водню. На рис. 2 показано розподіл еквівалентної

пластичної деформації ϵ_p в околі вершини тріщини за різних внутрішніх тисків, а на рис. 3 – розподіл концентрацій водню в місцях захоплення C_T поблизу вершини тріщини, де вони нормовані на початкову концентрацію C_{L0} . Згідно з літературними результатами [11], початкова концентрація дифузійно-рухомого водню C_{L0} у матеріалі труби становить $2,08 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ або $4,42 \cdot 10^{-4} \text{ ppm}$.

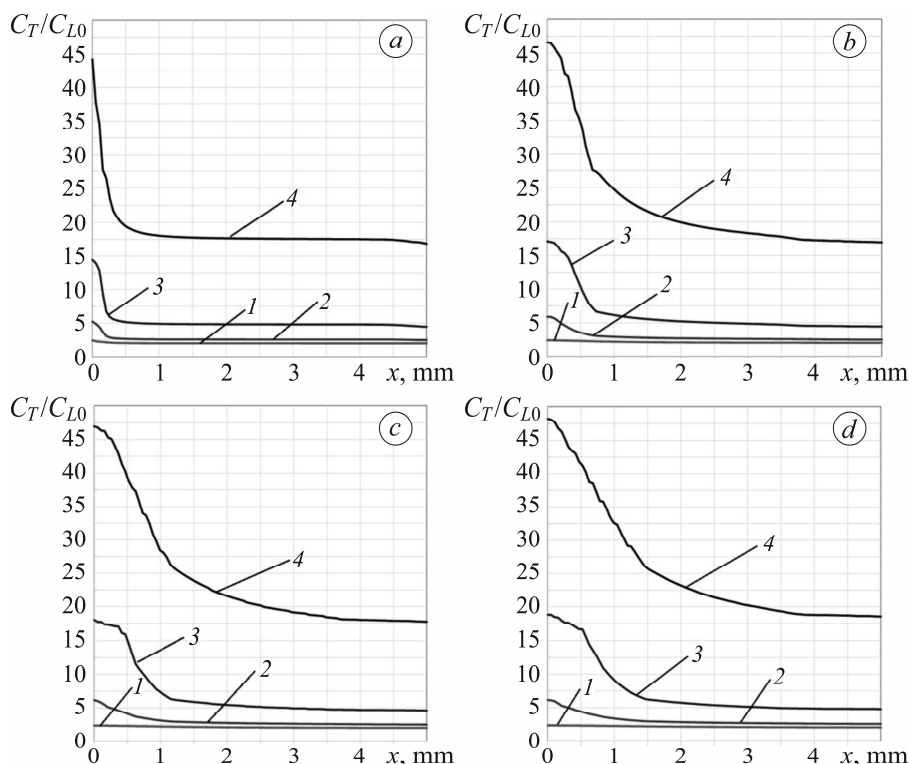


Рис. 3. Розподіл концентрацій пасткованого водню відносно початкової концентрації C_{L0} вздовж осі Ox від поверхні дефекту за різних внутрішніх тисків та типів тріщиноподібних дефектів ($a - a/c = 0,1$; $b - 0,5$; $c - 0,75$; $d - 1$): 1 – 7 МПа; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 30 МПа.

Fig. 3. Distribution of trapped hydrogen concentration relative to the initial hydrogen concentration C_{L0} along the Ox axis from the surface of the defect for different values of internal pressure for various types of crack-like defects ($a - a/c = 0,1$; $b - 0,5$; $c - 0,75$; $d - 1$): 1 – 7 МПа; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 30 МПа.

Концентрація водню в пастках C_T зростає із внутрішнім тиском. Це зумовлено тим, що пасткований водень пов'язаний з пластичною деформацією. У дослідженні дифузії водню використали залежність (11) [20], яка описує вплив пластичної деформації ϵ_p на кількість місць захоплення водню N_T , де N_T , своєю чергою, безпосередньо пов'язана з концентрацією пасткованого водню C_T залежністю (12).

Вищий внутрішній тиск викликає більшу еквівалентну пластичну деформацію в околі вершини тріщини (рис. 2).

Максимальне значення C_T більше, ніж C_L [30], коли внутрішній тиск досягає 30 МПа. Як бачимо, не тільки концентрація дифузійного водню C_L , але й концентрація пасткованого стає високою.

Як показують результати розрахунків, внутрішній тиск водневовмісного середовища суттєво впливає на напружено-деформований стан в околі тріщиноподібних дефектів, а саме, на гідростатичне напруження [30] та пластичні деформації (рис. 2). Поле напружень в околі вершини тріщини характеризується такими

параметрами механіки руйнування, як коефіцієнт інтенсивності напружень для лінійно-пружних тіл, J -інтеграл, розкриття вершини тріщини тощо. Таким чином, гідростатичне напруження та пластичні деформації навколо вершини тріщини пов'язані з параметрами механіки руйнування, а отже, можна оцінити максимальне значення концентрації водню навколо вершини тріщини за їх допомогою.

ВИСНОВКИ

Розроблено математичні моделі наводнювання низьколегованих сталей для оцінювання підвищеної концентрації пасткованого водню в околі дефектів різного типу. Зроблено розрахункові оцінки локального розподілу пасткованого водню в околі пустот різної форми та тріщиноподібних дефектів на внутрішній поверхні трубопроводу із низьколегованої сталі залежно від тиску водневовмісного середовища. Виявлено вплив форми півеліптичних тріщин на внутрішній поверхні трубопроводу на локальну концентрацію водню біля таких дефектів. Встановлено, що зі зменшенням значення a/c локальна концентрація водню зростає, тобто найнебезпечнішими з цього погляду є дефекти за $a/c \cong 0,1$. Визначено, що максимальне значення пасткованого водню більше, ніж дифузійно-рухомого, коли внутрішній тиск у трубопроводі сягає 30 МПа.

1. *The energy approach to the evaluation of hydrogen effect on the damage accumulation* / Y. Ivanytskyi, Y. Kharchenko, O. Hembara, O. Chepil, Y. Sapuzhak, and N. Hembara // *Procedia Structural Integrity*. – 2019. – **16**. – P. 126–133.
2. *Kumnick A. J. and Johnson H. H. Deep trapping states for hydrogen in deformed iron* // *Acta Metallurgica*. – 1980. – **28**, № 1. – P. 33–39. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(80\)90038-3](https://doi.org/10.1016/0001-6160(80)90038-3)
3. *Effects of hydrogen influence on strained steel 1020* / B. Mytsyk, Y. Ivanytsky, O. Hembara, Y. Kost, S. Shtayura, and O. Sakharuk // *Int. J. of Hydrogen Energy*. – 2020. – **45**, № 16. – P. 10199–10208. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.004>
4. *Influence of hydrogen on the residual service life of a gas pipeline in the maneuvering mode of operation* / O. E. Andreikiv, I. Ya. Dolins'ka, V. Z. Kukhar, and I. P. Shtoiiko // *Materials Science*. – 2016. – **51**, № 4. – P. 500–508. <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9868-6>
5. *Dmytrakh I., Syrotyuk A., and Leshchak R. Specific effects of hydrogen concentration on resistance to fracture of ferrite-pearlitic pipeline steels* // *Procedia Structural Integrity*. – 2019. – **16**. – P. 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.029>
6. *Syrotyuk A. M., Leshchak R. L., and Dorosh M. I. Experimental and analytic investigation of the hydrogenation of pipe steels* // *Materials Science*. – 2018. – **53**, № 6. – P. 811–817. <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0140-0>
7. *Skalskyi V., Andreikiv O., and Dolinska I. Assessment of subcritical crack growth in hydrogen-containing environment by the parameters of acoustic emission signals* // *Int. J. of Hydrogen Energy*. – 2018. – **43**. – P. 5217–5224.
8. *Mathematical modeling of hydrogen cracks growth kinetics in metallic materials at high hydrogen parameters* / O. Andreykiv, I. Dolinska, S. Nastasiak, V. Sheketa // *13th Int. Conf. on Advanced Computer Information Technologies, ACIT'2023 (21–23 September, 2023, Wroclaw, Poland)*. – 2023. – P. 88–91. DOI 10.1109/ACIT58437.2023.10275487
9. *Numerical analysis of hydrogen diffusion problems using the finite element method* / H. Kanayama, T. Shingoh, S. Ndong-Mefane, M. Ogino, R. Shioya, and H. Kawai // *Theor. and Appl. Mech. Japan*. – 2008. – **56**. – P. 389–400.
10. *Transient hydrogen diffusion analyses coupled with crack-tip plasticity under cyclic loading* / H. Kotake, R. Matsumoto, S. Taketomi, and N. Miyazaki // *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*. – 2008. – **85**, № 8. – P. 540–549.
11. *Krom A. H. M., Koers R. W. J., and Bakkerr A. Hydrogen transport near a blunting crack tip* // *J. of the Mech. and Phys. of Solids*. – 1999. – **47**, № 4. – P. 971–992.
12. *Hembara O. V., Chepil O. Y., and Hembara N. T. Influence of the parameters of discretization on the accuracy of numerical solution of the three-dimensional problem of hydrogen diffusion* // *Materials Science*. – 2016. – **52**, № 2. – P. 280–286. <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9955-8>

13. *Finite element implementation of an elastoplastic constitutive equation in the presence of hydrogen* / L. Liu, R. Miresmaeili, M. Ogino, and H. Kanayama // *J. of Computational Sci. and Technol.* – 2011. – 5, № 1. – P. 62–76.
14. *Finite element analysis of the stress and deformation fields around the blunting crack tip* / R. Miresmaeili, M. Ogino, R. Shioya, H. Kawai, and H. Kanayama // *Memoirs of the Faculty of Eng., Kyushu University.* – 2008. – 68, № 4. – P. 151–161.
15. *Sofronis P. and McMeeking R. M.* Numerical analysis of hydrogen transport near a blunting crack tip // *J. of the Mech. and Phys. of Solids.* – 1989. – 37, № 3. – P. 317–350.
16. *Taha A. and Sofronis P.* A micromechanics approach to the study of hydrogen transport and embrittlement // *Eng. Fract. Mech.* – 2001. – 68, № 6. – P. 803–837.
17. *Modelling hydrogen embrittlement in 316L austenitic stainless steel for the first wall of the Next European Torus* / J. Toribio, A. Valiente, R. Cortes, and L. Caballero // *Fusion Eng. and Design.* – 1995. – 29, Is. C. – P. 442–447.
18. *Two-dimensional numerical modelling of hydrogen diffusion assisted by stress and strain* / J. Toribio, D. Vergara, M. Lorenzo, and V. Kharin // *WIT Transactions on Eng. Sci.* – 2009. – 65. – P. 131–140.
19. *Kürten D., Khader I., and Kailer A.* Determining the effective hydrogen diffusion coefficient in 100Cr6 // *Mater. and Corr.* – 2020. – 71. – P. 918–923.
<https://doi.org/10.1002/maco.20191132>
20. *Experimental and numerical study on hydrogen-induced failure of X65 pipeline steel* / M. Lin, H. Yu, D. Wang, A. Díaz, A. Alvaro, V. Olden, E. Koren, Y. Ding, J. He, and Z. Zhang // *Mater. Sci. & Eng. A.* – 2024. – 894. – Article number 146175.
21. *Di Leo C. V. and Anand L.* Hydrogen in metals: A coupled theory for species diffusion and large elastic-plastic deformations // *Int. J. of Plasticity.* – 2013. – 43. – P. 42–69.
<https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2012.10.015>
22. *Díaz A., Alegre J. M., and Cuesta I. I.* Coupled hydrogen diffusion simulation using a heat transfer analogy // *Int. J. of Mech. Sci.* – 2016. – 115–116. – P. 360–369.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.07.020>
23. *Fernández-Sousa R., Betegón C., and Martínez-Pañeda E.* Analysis of the influence of micro-structural traps on hydrogen assisted fatigue // *Acta Materialia.* – 2020. – 199. – P. 253–263.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.08.030>
24. *Simulation of ductile-to-brittle transition combining complete Gurson model and CZM with application to hydrogen embrittlement* / M. Lin, H. Yu, Y. Ding, V. Olden, A. Alvaro, J. He, and Z. Zhang // *Eng. Fract. Mech.* – 2022. – 268. – Article number 108511.
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108511>
25. *Kumnick A. J. and Johnson H. H.* Steady state hydrogen transport through zone refined irons // *Metallurgical Transactions A.* – 1975. – 6, № 5. – P. 1087–1091.
DOI: 10.1007/bf02661363
26. *Oriani R. A.* The diffusion and trapping of hydrogen in steel // *Acta Metallurgica.* – 1970. – 18, № 1. – P. 147–157.
27. *A new energy approach to predicting fracture resistance in metals* / M. Dutkiewicz, O. Hembara, O. Chepil, M. Hrynenko, and T. Hembara // *Materials.* – 2023. – 16, № 4. – Article number 1566.
28. *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, and N. Hembara // *Materials.* – 2022. – 15, № 19. – Article number 6596.
29. *Hydrogen diffusion analyses of a cracked steel pipe under internal pressure* / K. Takayama, R. Matsumoto, S. Taketomi, and N. Miyazaki // *Int. J. of Hydrogen Energy.* – 2011. – 36, № 1. – P. 1037–1045.
30. *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, and N. Hembara // *Procedia Structural Integrity.* – 2024. – 59. – P. 190–197.
<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.028>

Одержано 04.10.2024