

УДК 620.197.5:669.788

АНАЛІТИЧНА ОЦІНКА КОНЦЕНТРАЦІЇ ВОДНЮ В ДЕФЕКТНОМУ МАТЕРІАЛІ

О. В. ГЕМБАРА^{1, 2}, А. М. СИРОТЮК¹, І. М. СОВ'ЯК¹,
Я. І. САПУЖАК¹, Н. Т. ГЕМБАРА¹, М. В. ГРИНЕНКО¹

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

² Національний університет "Львівська політехніка"

Сформульовано задачу дифузії водню в металі з порами. Пори є пастками для водню, їх вважали точковими, розподіленими однорідно по всьому об'єму металу. Отримано розв'язки задачі дифузії в дефектному тілі. Зокрема, для пластини одержано вирази для визначення концентрації як дифузійно-рухомого, так і пасткового водню. Також отримано співвідношення для визначення кількості сорбованого водню дефектною пластиною в довільний момент часу під час її наводнювання. Порівняно кількості водню, сорбованого бездефектною пластиною і пластиною з однорідно розподіленими пастками, та встановлено 2–3 разове перевищення вмісту водню в останній.

Ключові слова: концентрація водню, пороподібні дефекти, дифузійно-рухомий водень, пастковий водень.

The problem of hydrogen diffusion in a metal with pores is formulated. Pores are sources of absorption (traps) of hydrogen. Traps were considered to be point-like, distributed uniformly over the entire volume of the metal. Solutions to the problem of diffusion in a defective body have been obtained. In particular, expressions for determining the concentration of both diffusion-moving and trapped hydrogen are obtained for the plate. We also obtained a ratio for determining the amount of hydrogen sorbed by a defective plate at an arbitrary moment of time during its hydrogenation. The amount of hydrogen sorbed by a defect-free plate and a plate with uniformly distributed traps was compared. A 2–3 time excess of hydrogen content in the defective plate compared to the defect-free plate was established.

Keywords: hydrogen concentration, void-like defects, diffusible hydrogen, trapped hydrogen.

Вступ. На сьогодні перспективні плани розвитку світової енергетики базуються на широкому використанні водню як енергоносія, а трубопровідна система розглядається як найефективніший спосіб його транспортування [1, 2]. Це зумовлює постійну інтенсифікацію досліджень, пов'язаних з оцінкою впливу водню на механічні характеристики та опір втомі, а також руйнування трубних сталей [3–5]. При цьому концентрацію водню у матеріалі вважають основним чинником, який визначає його роботоздатність за цих експлуатаційних умов [6, 7].

Відомо, що водень, який дифундує в кристалічній ґратці металу, здатний взаємодіяти з різними дефектами реальних твердих тіл. Головно через цю взаємодію він може впливати на механічні властивості сплавів [8–13]. У цьому беруть участь численні явища такі, як розчинення водню, його дифузія, перерозподіл та взаємодія з вакансіями, дислокаціями, межами зерен та іншими межами поділу фаз. На практиці вміст водню завжди суттєво перевищує рівноважне значення концентрації через велику кількість пасток водню (вакансії, дислокації, межі зерен і по-

верхневї пастки). На основї енергїї активацїї водневої пастки (E_b) їх подїляють на оборотнї ($E_b < 60 \text{ kJ/mol}$) і необоротнї пастки водню ($E_b > 60 \text{ kJ/mol}$) [8, 14]. Оборотними є вакансїї, атоми розчиненої речовини, дислокацїї, межї зерен і когерентнї видїлення, тодї як карбїди, включення, пори, трїщини, мїжфазнї межї є необоротними пастками водню.

Оборотнї пастки знаходяться в динамїчнїй рївновазї мїж собою і з рївноважними положеннями атомів водню в ідеальних ґратках. Водень досить легко йде з оборотних пасток під впливом будь-яких чинників, тодї як у необоротних він зв'язаний так сильно, що його вважають дифузійно-нерухомим (наприклад, він не залишає необоротнї пастки і за випробувань на розтяг з малими швидкостями [11, 15]). У разї дегазацїї металу за кїмнатної температури водень поступово йде з оборотних пасток, а необоротнї віддають його лише за суттєвого пїдвищення температури (до рївня, вїдповїдного енергїї зв'язку). Захоплення необоротними пастками призводить до зниження кїлькостї дифузійно-рухомого водню в металї. Накопичення водню у дефектах металу викликає сильне погїршення експлуатацїйних характеристик матерїалу [6, 16–20].

З їншого боку, спрямоване створення пасток [8] є ефективним способом боротьби з водневою крихкїстю. Тому вивчення взаємодїї водню з недосконалїстю структури металу становить великий практичний їнтерес.

На сьогоднї явище захоплення пастками водню в сталях недостатньо вивчене, а зв'язок з водневою крихкїстю не з'ясований. Попри те, вважають, що це явище вїдїграє важливу роль у водневїй крихкостї. Чутливїсть сталей до водневого окрихчення корелює з наявнїстю оборотних пасток водню. Однак важко отримати однозначну експериментальну їнформацїю про роль пасток. Повний опис дифузїї водню в дефектних тїлах [21–25] зводять до вїршення систем нелїнійних диференцїальних рївнянь з координатною, часовою та концентрацїйною залежностями параметрів дифузїї. Їх розв'язання є складним завданням і на практицї обмежується побудовою простих математичних моделей, якї враховують будь-якї характернї особливостї структури зразка.

Нижче розглянуто дифузїю водню в матерїалї (твердому тїлї) з дефектами (пастками), якї взаємодїють з дифузною речовиною (воднем). Цї пастки вловлюють дифузнї атоми і (або) деякий час перешкоджають їм дифузїї (тимчасове утримання), або взагалї виводять водень з мїграцїйного процесу (постїйне утримання).

Формулювання задачі дифузїї водню в дефектних тїлах. Нехай маємо метал з порами, в якїй дифундує водень. Пори є пастками водню, їм вважаємо точковими, розподїленими однорїдно по всьому об'їму металу. Таке твердження узгоджується їз експериментальними результатами [26], де у низьколегованїй трубнїй сталї на нанорївнї її мїкроструктури виявлено практично рївномїрно розподїленї пороподїбнї дефекти.

Пастки характеризуються вїдносним об'їмом V_{trap} – вїдношенням об'їму пасток вїбраного макроскопїчного об'їму металу до усього об'їму. Математична коректнїсть цїєї процедури (рївномїрного розподїлу пасток по всьому об'їму металу) описана ранїше [11, 16, 18, 19].

За збїльшення ємностї ізолюваних один вїд одного пасток (або концентрацїї пасток, що, мабуть, фїзично менш реалїстично) систему рївнянь дифузїї водню формально описують кїнетикою оборотної хїмїчної реакцїї 1-го порядку [27]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_L}{\partial t} &= D\Delta C_L - k_1(m_* - C_T)C_L + k_2(C_* - C_L)C_T ; \\ \frac{\partial C_T}{\partial t} &= k_1(m_* - C_T)C_L - k_2(C_* - C_L)C_T . \end{aligned} \quad (1)$$

Тут C_L – концентрація водню в ґратці металу; C_* – концентрація пасток в ґратці, які можуть поглинути водень у металі; C_T – складова концентрації водню в металі, яка припадає на пастки; m_* – концентрація точкових пасток; D – коефіцієнт дифузії водню; Δ – оператор Лапласа; k_1 і k_2 описують відповідно сорбцію атомів водню незайнятими пастками і вихід атомів водню з пасток.

За умови незалежності коефіцієнта дифузії D від концентрації C та $C \ll C_*$, $m \ll m_*$ система рівнянь (1) стає лінійною:

$$\frac{\partial C_L}{\partial t} = D\Delta C_L - kC_L + \lambda C_T, \quad (2a)$$

$$\frac{\partial C_T}{\partial t} = kC_L - \lambda C_T, \quad (2b)$$

де $k = m_*k_1$; $\lambda = C_*k_2$.

Нестаціонарна дифузія водню за оборотної хімічної реакції 1-го порядку в пластині. Для опису нестаціонарної дифузії водню за взаємодії водню і пасток у пластині товщиною h , згідно з рівняннями (2), необхідно розв'язати систему диференціальних рівнянь

$$\frac{\partial C_L}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_L}{\partial x^2} - kC_L + \lambda C_T, \quad (3a)$$

$$\frac{\partial C_T}{\partial t} = kC_L - \lambda C_T \quad (3b)$$

за початкових

$$C_L(x, 0) = C_1(x), \quad C_T(x, 0) = C_2(x) \quad (4)$$

та крайових умов

$$C_L(0, t) = \varphi_1(t), \quad C_L(L, t) = \varphi_2(t), \quad (5)$$

де C_1 , C_2 – концентрація дифузійно-рухомого та пасткового водню в початковий момент, відповідно; $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$ – функції, які описують закони зміни концентрації водню на краях пластини.

Тут за крайових умов розглядали тільки дифузійно-рухомий водень (дифузанти з концентрацією C_1 дифундує в пластині з коефіцієнтом дифузії $D_1 = D$). Умови для нерухомої фази (продукт реакції з концентрацією C_2 , його коефіцієнт дифузії $D_2 = 0$) автоматично з'являються з розв'язків рівняння (3b) [28]

$$C_T(x, t) = C_T(x) e^{-\lambda t} + k e^{-\lambda t} \int_0^t e^{\lambda \tau} C_L(x, \tau) d\tau. \quad (6)$$

Розв'язок для дифузійно-рухомої фази шукали у вигляді

$$C_L(x, t) = C_{L\infty}(x, t) + \tilde{C}_L(x, t), \quad (7)$$

де $C_{L\infty}(x, t)$ – розв'язок для стаціонарного стану дифузії за змінних крайових умов, а $\tilde{C}_L(x, t)$ – розв'язок для нестаціонарного стану за нульових крайових умов, але за складних початкових:

$$\tilde{C}_L(x, t) = C_{10}(x) - C_{L\infty}(x, 0). \quad (8)$$

Очевидно [28], що

$$C_{L\infty}(x, t) = \varphi_1(t) + \frac{x}{h} [\varphi_2(t)] - \varphi_1(t). \quad (9)$$

$$\text{Тоді} \quad \tilde{C}_L(x, 0) = C_{10}(x) - \varphi_1(0) - \frac{x}{h} [\varphi_2(0) - \varphi_1(0)]. \quad (10)$$

Аналогічні вирази можна отримати і для концентрації іммобілізованих молекул дифузанта. Таким чином, необхідно розв'язати систему рівнянь:

$$\frac{\partial \tilde{C}_L}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \tilde{C}_L}{\partial x^2} - k\tilde{C}_L + \lambda C_T, \quad \frac{\partial C_T}{\partial t} = k\tilde{C}_L + \lambda C_T \quad (11)$$

з початковими та крайовими умовами:

$$\begin{aligned} \tilde{C}_L(x, 0) &= C_{10}(x) - \varphi_1(0) - \frac{x}{h} [\varphi_2(0) - \varphi_1(0)]; \\ C_T(x, 0) &= C_{20}(x) - \left[\varphi_2(0) - \varphi_1(0) \frac{x}{h} \right] \frac{k}{\lambda}; \\ \tilde{C}_L(0, t) &= 0; \quad \tilde{C}_L(h, t) = 0, \end{aligned} \quad (12)$$

де $\tilde{C}_L(x, 0)$ і C_T відображають концентрації молекул газу в рухомому та нерухомому станах, відповідно. Розв'язок системи (11) шукали у вигляді [28]

$$\tilde{C}_L(x, 0) = A_{\text{trap}} \sin \omega x e^{-\alpha_{\text{trap}} t} + B_{\text{trap}} \cos \omega x e^{-\alpha_{\text{trap}} t}. \quad (13)$$

Константи A_{trap} , B_{trap} і ω знайдено з крайових та початкових умов.

З нульових крайових умов одразу отримаємо:

$$B_{\text{trap}} = 0 \text{ і } \omega = n\pi/h.$$

Тоді рівняння (13) запишемо у вигляді

$$\tilde{C}_L(x, t) = (A_1 e^{-\alpha_1 t} + A_2 e^{-\alpha_2 t}) \sin n\pi x / p,$$

за $t = 0$

$$\tilde{C}_L(x, 0) = (A_1 + A_2) \sin n\pi x / b,$$

де A_1, A_2 визначають з початкових умов (12).

Розглянемо тепер окремий випадок. За сталих крайових умов

$$C_L(x, 0) = C_L(0); \quad C_T(x, 0) = C_T(0); \quad C(0, t) = C_L^0; \quad C(h, t) = C_L^1$$

отримали співвідношення для визначення концентрації дифузійно-рухомого водню:

$$\begin{aligned} C_L(x, t) &= C_L^0 + (C_L^1 - C_L^0) \frac{x}{h} + \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n\pi A} \left\{ [(C_L(0)B_1 - B_2)(-\alpha_1 + \lambda) + \lambda(C_T(0)B_1 - KB_2)] e^{-\alpha_1 t} + \right. \\ &\left. + [(C_L(0)B_1 - B_2)(\alpha_2 - \lambda) - \lambda(C_T B_1 - KB_2)] e^{-\alpha_2 t} \right\} \sin n\pi x / h \end{aligned}$$

та пасткового водню:

$$\begin{aligned} C_T(x, t) &= C_T(0) e^{-\lambda t} + \left[C_L^0 + (C_L^1 - C_L^0) \frac{x}{h} \right] \frac{k}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) + \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n\pi A} \left\{ \left[(C_L(0)B_1 - B_2) + \frac{\lambda}{\lambda - \alpha_1} + (C_T(0)B_1 - KB_2) \right] (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\lambda t}) + \right. \\ &\left. - \left[(C_L(0)B_1 - B_2) + \frac{\lambda}{\lambda - \alpha_1} + (C_T(0)B_1 - KB_2) \right] (e^{-\alpha_2 t} - e^{-\lambda t}) \right\} \sin n\pi x / h, \end{aligned}$$

де $\alpha_1 = \frac{1}{2}(k + \lambda + D\omega^2) - A$; $\alpha_2 = \frac{1}{2}(k + \lambda + D\omega^2) + A$; $A = \sqrt{k\lambda + \frac{1}{4}(k + \lambda - D\omega^2)^2}$.

Сорбція водню пластиною за сталих крайових умов. Розглянули дифузійно водню з постійного джерела в плоску пластину завтовшки $h = 2L$. У цьому випадку крайові умови:

$$C_L(x, 0) = 0; \quad C_T(x, 0) = 0; \quad C_L^0 = C_L^h = C_{10},$$

а тому $B_1 = 2; B_2 = 2C_{10}$.

Отримали розподіл концентрації дифузійно-рухомого водню по товщині пластини

$$C_L(x, t) = C_{10} \left\{ 1 - \frac{2}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)A} \times \right. \\ \left. \times \left[(-\alpha_1 + k + \lambda) e^{-\alpha_1 t} + (\alpha_2 - k - \lambda) e^{-\alpha_2 t} \right] \sin \frac{(2m+1)\pi}{h} x \right\},$$

концентраційний профіль пасткового водню

$$C_T(x, t) = \left\{ \frac{k}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) + \right. \\ \left. + \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2kC_{10}}{(2m+1)\pi A} \left[\frac{\alpha_1 - k - \lambda}{\lambda - \alpha_1} (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\lambda t}) - \frac{\alpha_2 - k - \lambda}{\lambda - \alpha_1} (e^{-\alpha_2 t} - e^{-\lambda t}) \right] \sin \frac{(2m+1)\pi}{h} x \right\},$$

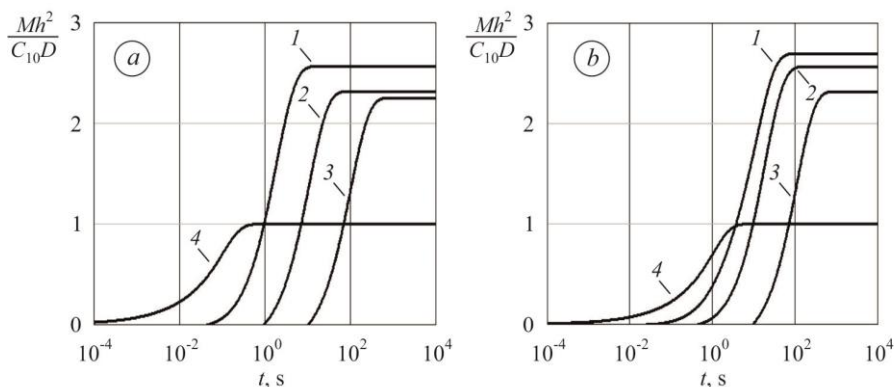
потік газу в пластину

$$J(t) = \frac{DS}{h} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{4C_{10}}{A} \left\{ (-\alpha_1 + k + \lambda) e^{-\alpha_1 t} + (\alpha_2 - k - \lambda) e^{-\alpha_2 t} \right\}$$

та кількість газу у зразку в момент часу t

$$M(t) = \int_0^h [C_L(x, t) + C_T(x, t)] dx = \\ = \frac{DC_{10}}{h^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{A} \left\{ \left(\frac{\alpha_1 - k - \lambda}{\alpha_1} \right) (1 - e^{-\alpha_1 t}) + \left(\frac{\alpha_2 - k - \lambda}{\alpha_2} \right) (1 - e^{-\alpha_2 t}) \right\}.$$

Величини α_1, α_2 та A розраховують при $\omega = (2m+1) \cdot \pi/h$, де $m = 0, 1, 2, \dots$



Кількість водню, сорбованого дефектним матеріалом на момент часу t (1–3) за різних значень констант прямої і зворотної реакції та бездефектним (4):

$$D/h^2 = 1 \text{ (a)}, \quad D/h^2 = 0,1 \text{ (b)}; \quad 1 - k = 10, \lambda = 1; \quad 2 - k = 1, \lambda = 0,1; \quad 3 - k = 0,1, \lambda = 0,01.$$

The amount of hydrogen sorbed by the defective material at the moment of time t (1–3) for different values of the forward and reverse reaction constants and in the defect-free material (4):

$$D/h^2 = 1 \text{ (a)}, \quad D/h^2 = 0.1 \text{ (b)}; \quad 1 - k = 10, \lambda = 1; \quad 2 - k = 1, \lambda = 0.1; \quad 3 - k = 0.1, \lambda = 0.01.$$

Графік залежності кількості водню, який сорбується дефектною пластиною, від часу наведено на рисунку (криві 1–3). Також подано результати розрахунків дифузії водню в бездефектну пластину [28] (крива 4). У початковий момент часу вважали, що водень у пластині відсутній, а під час експерименту його концентрацію на двох крайових поверхнях тримали сталою.

Спостерігаємо кількарразове (2–3 рази) перевищення вмісту водню в дефектній пластині (криві 1–3) порівняно з бездефектною (крива 4). Найімовірніше це пов'язано з великою кількістю пасток водню. Його вміст залежить від коефіцієнта дифузії D , товщини пластини h та коефіцієнтів сорбції-десорбції водню k , λ пастками.

ВИСНОВКИ

Сформульовано аналітичні залежності для розрахунку концентрації водню в твердому тілі з дефектами (пастками), які взаємодіють з дифузною речовиною. Пастки вважали точковими, розподіленими однорідно по всьому об'єму металу. Розглянуто випадок тимчасового утримання пастками дифузійно-рухомого водню. Це дало змогу використати для моделювання дифузії водню рівняння, які описують кінетику оборотної хімічної реакції першого порядку. Отримані співвідношення дозволяють визначити кількість сорбованого водню в довільний момент часу під час наводнювання пластини.

Робота виконана за часткової фінансової підтримки Національного фонду досліджень України (Проект № 2020.02/0049).

1. Use of existing steel pipeline infrastructure for gaseous hydrogen storage and transport: A review of factors affecting hydrogen induced degradation / A. Laureys, R. Depraetere, M. Cauwels, T. Depover, S. Hertelé, and K. Verbeken // J. Nat. Gas Sci. Eng. – 2022. – **101**. – Article number: 104534. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104534>.
2. Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation / J. O. Abe, A. P. I. Popoola, E. Ajenifuja, and O. M. Popoola // Int. J. of Hydrogen Energy. – 2019. – **44**, № 29. – P. 15072–15086. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.068>.
3. Hydrogen in pipeline steels: Recent advances in characterization and embrittlement mitigation / H. Li, R. Niu, W. Li, H. Lu, J. Cairney, and Y.-S. Chen // J. of Natural Gas Sci. and Eng. – 2022. – **105**. – Article number: 104709. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104709>.
4. Capelle J., Dmytrakh I., and Pluvinage G. Hydrogen effect on local fracture emanating from notches in pipeline from steel API X52 // Strength of Mat. – 2009. – **41**, № 5. – P. 493–500. <https://doi.org/10.1007/s11223-009-9157-9>.
5. Nykyforchyn H. In-service degradation of pipeline steels // Lecture Notes in Civil Eng. – 2021. – **102**. – P. 15–29. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58073-5_2.
6. Understanding and mitigating hydrogen embrittlement of steels: A review of experimental, modelling and design progress from atomistic to continuum / O. Barrera, D. Bombac, Y. Chen, T. D. Daff, E. Galindo-Nava, P. Gong, D. Haley, R. Horton, I. Katzarov, J. R. Kermodé, C. Liverani, M. Stopher, and F. Sweeney // Materials Science. – 2018. – **53**, № 9. – P. 6251–6290. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1978-5>.
7. Evaluation of electrochemical hydrogen absorption in welded pipe with steel API X52 / J. Capelle, I. Dmytrakh, Z. Azari, and G. Pluvinage // Int. J. of Hydrogen Energy. – 2013. – **38**, № 33. – P. 14356–14363. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.08.118>.
8. Review of hydrogen embrittlement in metals: Hydrogen diffusion, hydrogen characterization, hydrogen embrittlement mechanism and prevention / X. Li, X. Ma, J. Zhang, E. Akiyama, Y. Wang, and X. Song // Acta Metallurgica Sinica (English Letters). – 2020. – **33**, № 6. – P. 759–773. <https://doi.org/10.1007/s40195-020-01039-7>.
9. Hydrogen embrittlement of industrial components: Prediction, prevention, and models / M. B. Djukic, G. M. Bakic, V. S. Zeravcic, A. Sedmak, and B. Rajcic // Corrosion. – 2016. – **72**, № 7. – P. 943–961. <https://doi.org/10.5006/1958>.
10. Hydrogen diffusivity in different microstructures of 42CrMo4 steel / A. Imdad, A. Zafra, V. Arniella, and J. Belzunce // Hydrogen. – 2021. – **2**, № 4. – P. 414–427. <https://doi.org/10.3390/hydrogen2040023>.

11. Mytsyk B., Hembara O., and Shechepanskyi P. Determination of hydrogen diffusion coefficients in metals by the method of low mechanical stresses // *Archive of Appl. Mech.* – 2022. – **92**, № 11. – P. 3203–3213. <https://doi.org/10.1007/s00419-022-02231-0>.
12. Dmytrakh I. M. Corrosion fracture of structural metallic materials: Effect of electrochemical conditions in crack // *Strain.* – 2011. – **47**, Suppl. 2. – P. 427–435. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2010.00784.x>
13. Skalskyi V., Andreikiv O., 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**, Is. 10. – P. 5217–5224. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.124>
14. Observation of hydrogen trapping at dislocations, grain boundaries, and precipitates / Y.-S. Chen, H. Lu, J. Liang, A. Rosenthal, H. Liu, G. Sneddon, I. McCarroll, Z. Zhao, W. Li, and A. Guo // *Science.* – 2020. – **367**, № 6474. – P. 171–175. <https://doi.org/10.1126/science.aaz0122>.
15. Kim J. and Tasan C. C. Microstructural and micro-mechanical characterization during hydrogen charging: An in situ scanning electron microscopy study // *Int. J. of Hydrogen Energy.* – 2019. – **44**, № 12. – P. 6333–6343. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.128>.
16. 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. <https://doi.org/10.3390/ma16041566>.
17. Dwivedi S. K. and Vishwakarma M. Hydrogen embrittlement in different materials: A review // *Int. J. of Hydrogen Energy.* – 2018. – **43**, № 46. – P. 21603–21616. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.201>.
18. Effects of hydrogen influence on strained steel 1020 / B. Mytsyk, Ya. Ivanytskyi, O. Hembara, Ya. 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>.
19. Influence of hydrogen on the fracture resistance of pre-strained steam generator steel 22K / M. Dutkiewicz, O. Hembara, Ya. Ivanytskyi, M. Hvozdiuk, O. Chepil, M. Hrynenko, and N. Hembara // *Materials.* – 2022. – **15**, № 19. – Article number: 6596. <https://doi.org/10.3390/ma15196596>.
20. 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. Y. Dolins'ka, and A. R. Dzyubyk // *Materials Science.* – 2018. – **54**, № 1. – P. 61–68. <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0158-3>.
21. 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.10.046>.
22. Martin M. L. and Sofronis P. Hydrogen-induced cracking and blistering in steels: A review // *J. of Natural Gas Sci. and Eng.* – 2022. – **101**. – Article number: 104547. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104547>.
23. Krom A. H. M., Koers R. W. J., and Bakkerr A. Hydrogen transport near a blunting crack tip // *J. Mech. and Phys. Solids.* – 1999. – **47**, № 4. – P. 971–992. [https://doi.org/10.1016/S0022-5096\(98\)00064-7](https://doi.org/10.1016/S0022-5096(98)00064-7).
24. 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 // *Theoretical and Appl. Mech. Japan.* – 2008. – **56**. – P. 389–400. <https://doi.org/10.11345/nctam.56.389>.
25. Araújo D. F., Vilar E. O., and Palma Carrasco J. A critical review of mathematical models used to determine the density of hydrogen trapping sites in steels and alloys // *Int. J. of Hydrogen Energy.* – 2014. – **39**, № 23. – P. 12194–12200. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.06.036>
26. Dmytrakh I., Syrotyuk A., and Leshchak R. Role of electrochemically diffusible hydrogen in the initial damage of low-alloyed pipeline steel // *Current Topics in Electrochemistry.* – 2022. – **24**. – P. 27–35.
27. Reconsideration of the hydrogen diffusion model using the McNabb-foster formulation / H. Kanayama, S. Ndong-Mefane, M. Ogino, and R. Miresmaeili // *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University.* – 2009. – **69**, № 4. – P. 149–161.
28. Mehrer H. Diffusion in Solids: Fundamentals, Methods, Materials, Diffusion-Controlled Processes. – Heidelberg: Springer, 2007. – 654 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-71488-0>.