

УДК 539.3:537.22:669.778

**ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ВОДНЮ У ЗОНІ ПЕРЕДРУЙНУВАННЯ БІЛЯ ВЕРШИНИ ТРІЩИНИ***Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ<sup>1</sup>, О. В. ГЕМБАРА<sup>1</sup>, О. Д. СМІЯН<sup>2</sup>, М. КОВАЛІК<sup>3</sup>*<sup>1</sup> *Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;*<sup>2</sup> *Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ;*<sup>3</sup> *Політехніка Радомська, Польща*

Аналітично в замкнутому вигляді побудовано розв'язок задачі про дифузію водню в зоні передруйнування біля вершини тріщини, що зовні контактує із водневовмісним середовищем, з урахуванням попереднього наводнювання матеріалу та градієнта поля механічних напружень у цій зоні. Виявлено, що наводнювання матеріалу та викликаний у ньому біля вершини тріщини під навантаженням градієнт гідростатичної компоненти тензора механічних напружень можуть спричинити в цій зоні концентрацію водню, що у кілька разів більша, ніж у середовищі. Виконано експериментальні дослідження і визначено локальну концентрацію водню в зоні передруйнування в зразках зі сталі 09Г2С.

**Ключові слова:** *концентрація водню, напружено-деформований стан, зона передруйнування, аналітичний розв'язок, задача дифузії.*

Деформування твердого тіла з тріщиною у водні пов'язане як зі зміною напружено-деформованого стану в зоні передруйнування, так і з перерозподілом та локальним накопиченням у ній водню [1–6]. Присутність під час руйнування проміжної стадії докритичного розвитку дефекту обумовлена тим, що для окрихчення (і руйнування) необхідне транспортування водню із його початкових місць знаходження і форми в деяку локальну область, де з досягненням критичного співвідношення кількості водню та механічних напружень відбувається елементарний акт руйнування. Подальший розвиток процесу контролює доставлення додаткових порцій водню у заново створені критичні області. Тріщина тут розвивається послідовними стрибками, поки не досягне критичної довжини і не настане швидке і повне руйнування [1, 2, 7]. Формування кількісної теорії водневого окрихчення металів ускладнене через достовірне визначення фактичних параметрів взаємодії водню з деформівним металом (локальної концентрації водню в області зародження руйнування, тиску водню у мікропорожнинах тощо). Нижче подано аналітичні залежності для встановлення концентрації водню в зоні передруйнування та розроблено методику експериментального дослідження у ній локальної концентрації.

**Формулювання задачі та її розв'язок.** Розглянемо пружно-пластичне ізоτροпне тіло, яке початково рівномірно наводнене до деякої концентрації водню  $C_0$  і містить плоску тріщину розміром  $l$  в умовах симетричного відносно площини тріщини напруженого стану (рис. 1). Нехай зовні у тріщину попадає водневовмісне середовище, забезпечуючи в поверхневому шарі біля її вершини деяку концентрацію водню.

Щоб коректно її визначити у зоні передруйнування, необхідно враховувати напружено-деформований стан у вершині тріщини. Встановлено [2], що найбільша

концентрація водню утворюється в об'ємах, де гідростатичні напруження досягають максимуму. Показано також, що розподіл напружень на продовженні тріщини (рис. 2) можна апроксимувати кусково-лінійною залежністю

$$\sigma(x) = \sigma_0 + (\sigma_m - \sigma_0)[xH(x_m - x)/x_m + H(x - x_m)], \quad (1)$$

де  $x$  – координата, напрямлена від вершини тріщини в глибину металу;  $x_m$  – абсциса точки максимуму механічних напружень;  $H(\cdot)$  – функція Хевісайда.

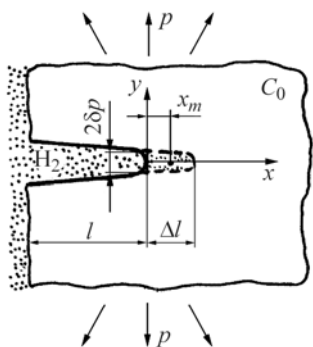


Рис. 1. Fig. 1.

Рис. 1. Схема навантаженої у водневовмісному середовищі пружно-пластичної пластини з тріщиною.

Fig. 1. A chart of an elasto-plastic plate with a crack loaded in hydrogen-containing environment.

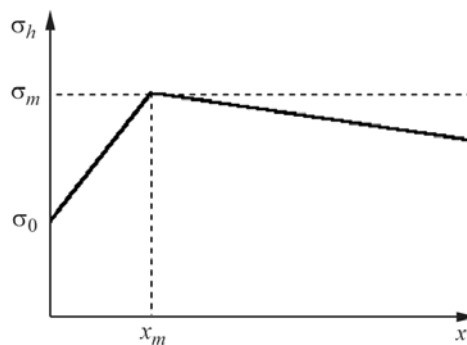


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Розподіл гідростатичної компоненти тензора механічних напружень біля вершини тріщини.

Fig. 2. Distribution of hydrostatic component of mechanical stresses tensor at the crack tip.

Припустивши, що час стрибка тріщини є настільки малий, що за його проміжок не встигають змінитися ні параметри розчинності та дифузії водню у металі, ні концентрація на поверхнях тріщини, задачу про накопичення водню у зоні передруйнування зведемо до розв'язку рівняння дифузії водню у полі напружень

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\nabla^2 C - \frac{DV_H}{RT} \nabla \sigma_h \nabla C \quad (2)$$

за умови неперервності його концентрації і потоку у точці максимуму напружень. Крайові умови мають вигляд

$$C(x, 0) = C_0, \quad (3)$$

$$C(0, t) = C_S, \quad C(\infty, t) < \infty \quad (4)$$

і враховують як концентрацію водню, що надходить у тріщину, так і водню, заздалегідь розподіленого за об'ємом металу.

В одновимірному наближенні задачу про дифузії водню в полі механічних напружень у вершині тріщини зведемо до розв'язку диференціального рівняння у частинних похідних другого порядку параболічного типу з кусково-неперервними коефіцієнтами

$$\begin{aligned} \partial C(x, t) / \partial t = D[\partial^2 C(x, t) / (\partial x^2)] - \{H(x_m - x) \times \\ \times [DV_H(\sigma_m - \sigma_0) / (RTx_m)] [\partial C(x, t) / (\partial x)]\} \end{aligned} \quad (5)$$

за умови неперервності концентрації водню  $C(x, t)$  і його потоку, якщо  $x = x_m$ .

Перейшовши до безрозмірних координат  $\xi = x/2\delta$ ,  $\tau = Dt/(2\delta)^2$  та застосувавши інтегральне перетворення Лапласа за часом  $\tau$  [8]

$$\bar{f}(\tau, \xi) = L[f(\tau, \xi)] = \int_0^{\infty} e^{-pt} f(\tau, \xi) dt, \quad (6)$$

отримаємо для зображення  $\bar{C}(\xi, p)$  функції  $C(\xi, \tau)$  вираз

$$\begin{aligned} \bar{C}(\xi, p) = & \frac{C_0}{p} + \left\{ \left[ (C_S - C_0) \left( -m - \sqrt{m^2 + p} + \sqrt{p} \right) \exp \left( m - \sqrt{m^2 + p} \right) - 2mC_0 \right] \times \right. \\ & \times \exp \left( m + \sqrt{m^2 + p} \right) \xi + \left[ 2mC_0 - (C_S - C_0) \left( -m + \sqrt{m^2 + p} + \sqrt{p} \right) \right] \times \\ & \times \exp \left( m + \sqrt{m^2 + p} \right) \left. \right\} \exp \left( m - \sqrt{m^2 + p} \right) \xi \times \\ & \times \left\{ p \left[ \left( -m - \sqrt{m^2 + p} + \sqrt{p} \right) \exp \left( m - \sqrt{m^2 + p} \right) - \right. \right. \\ & \left. \left. - \left( -m + \sqrt{m^2 + p} + \sqrt{p} \right) \exp \left( m + \sqrt{m^2 + p} \right) \right] \right\}^{-1}. \end{aligned} \quad (7)$$

Тут  $m = V_H(\sigma_m - \sigma_0)/(2RT)$ ,  $\sigma_m = 2,4\sigma_T$ ,  $\sigma_0 = \sigma_T/\sqrt{3}$ ;  $C_S = K_S\sqrt{P}$ .

Точний перехід від виразу (7) до оригіналу досить складний та пов'язаний з громіздкими перетвореннями. Для наближеного перетворення можна використати метод асимптотично еквівалентних функцій [1], який забезпечує хорошу відповідність точних і наближених значень оригіналів у всьому діапазоні зміни  $\tau$  для досить складних зображень. Для його реалізації знайдемо асимптотику виразу (7), якщо  $p \rightarrow 0$  і  $p \rightarrow \infty$ . Шукані функції мають вигляд

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{C}(\xi, p) & \rightarrow \frac{C_S}{p} \exp 2m\xi, \quad p \rightarrow 0, \\ \bar{C}(\xi, p) & \rightarrow \frac{C_0}{p} + \frac{(C_S - C_0)}{p} \exp(m - \sqrt{p})\xi + \\ & + 2mC_0 \frac{\exp(-\sqrt{p}(1 - \xi)) - \exp(-\sqrt{p}(1 + \xi))}{p\sqrt{p}}, \quad p \rightarrow \infty \end{aligned} \right. \quad (8)$$

і допускають точний перехід до оригіналів

$$\left\{ \begin{aligned} C & = C_0 + (C_S - C_0) \frac{2}{\xi} \sqrt{\frac{\tau}{\pi}} \exp(m\xi - \xi^2/4\tau), \quad \tau \rightarrow 0 \\ C & = C_S \exp 2m\xi, \quad \tau \rightarrow \infty. \end{aligned} \right. \quad (9)$$

Концентрацію водню  $C(x, t)$  для проміжних значень часу визначимо наближено, використовуючи метод граничної інтерполяції, тобто інтерполяційну формулу [2]

$$C(x, t) = \frac{C^0(x, t) C^\infty(x, t)}{C^0(x, t) + C^\infty(x, t) - C_0}. \quad (10)$$

У результаті маємо наближене співвідношення для визначення концентрації водню в зоні переддруйнування:

$$C(x,t) = \frac{C_S \exp 2m\xi \left[ \xi \sqrt{\tau} C_0 + 2\sqrt{\pi} (C_S - C_0) \exp(m\xi - \xi^2 / 4\tau) \right]}{\xi \sqrt{\tau} C_S \exp 2m\xi + 2\sqrt{\pi} (C_S - C_0) \exp(m\xi - \xi^2 / 4\tau)}. \quad (11)$$

Звідси безпосередньо випливають граничні випадки (9). Якщо початкова концентрація водню у металі рівна нулю, то це співвідношення збігається з виразом, одержаним раніше [2].

На рис. 3 зображено розподіл водню біля вершини тріщини для сталі 09Г2С, обчислений за формулою (11) ( $V_H = 1,96 \text{ cm}^3 / \text{mol}$ ,  $T = 293 \text{ K}$ ,  $\sigma_T = 290 \text{ MPa}$ ,  $D = 10^{-10} \text{ m}^2 / \text{s}$ ,  $C_0 / C_S = 0,5$ ). Вже впродовж декількох секунд у зоні переддруйнування досягається концентрація, яка суттєво перевищує поверхневу  $C_S$ .

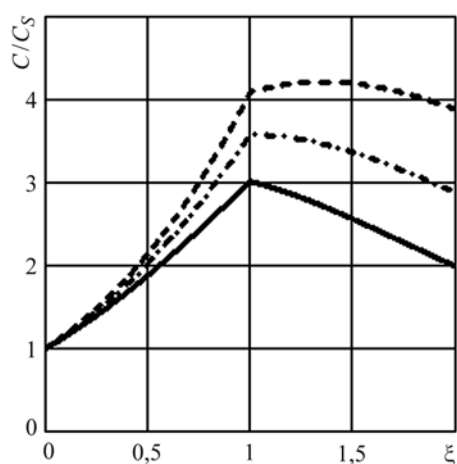


Рис. 3. Розрахунковий перерозподіл концентрації водню в полі механічних напружень біля вершини тріщини в різні моменти часу: суцільна лінія –  $\tau = 5$ ; штрихпунктирна – 10; штрихова – 20.

Fig. 3. Calculation redistribution of hydrogen concentration in the field of mechanical stresses at the crack tip in different moments of time: continuous line –  $\tau = 5$ ; dash-dotted – 10; dashed – 20.

**Експериментальне визначення локальної концентрації водню в зоні переддруйнування.** Поряд з теоретичними розрахунками знаходили концентрацію водню в зоні переддруйнування для плоских зразків зі сталі 09Г2С.

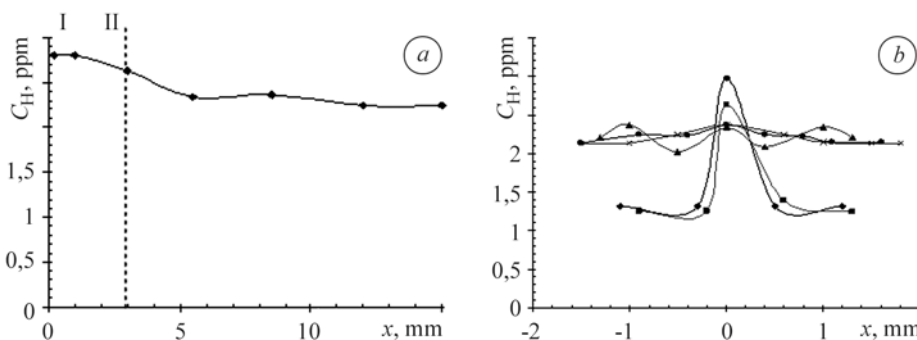


Рис. 4. Розподіл водню вздовж (а) (I – надріз; II – тріщина) та перпендикулярно (b) тріщині на відстані від поверхні надрізу 0,2 mm (◆); 3,0 (■); 5,5 (▲); 8,5 (×) і 12,0 mm (●).

Fig. 4. Hydrogen distribution along (a) (I is a notch; II is a crack) and perpendicular (b) to the crack at a distance of 0.2 mm from the notch surface (◆); 3.0 (■); 5.5 (▲); 8.5 (×) and 12.0 mm (●).

Зразки товщиною 1,5 mm наводнювали впродовж 2 h у накладній камері за тиску водню 0,2 МПа і температури 473 К. Після охолодження у зразках вирости-

ли втомну тріщину довжиною  $2l = 25$  mm за асиметрії циклу 0,3 і частоти навантаження 12 Hz. Далі їх навантажували розтягом у накладній камері у водні ( $P_H = 0,2$  МПа;  $T = 293$  К) до досягнення моменту старту тріщини і розвантажували без руйнування. Із зони перед вершиною тріщини вирізали фрагмент зразка розміром  $20 \times 20$  mm і охолоджували у рідкому азоті. Після цього вимірювали локальну концентрацію водню методом локального мас-спектрального аналізу з використанням лазерного зонда (рис. 4).

## ВИСНОВКИ

Подано розв'язок задачі про дифузію водню в зоні передруйнування біля вершини тріщини з урахуванням утвореного там напруженого стану та попереднього наводнювання матеріалу. Результати теоретичних і експериментальних досліджень вказують на те, що поле механічних напружень біля вершини тріщини збільшує концентрацію водню в цій зоні у кілька разів відносно поверхневої.

*РЕЗЮМЕ.* Аналітически в замкнутом виде построено решение задачи диффузии водорода в зоне предразрушения около вершины трещины, которая внешне контактирует с водородосодержащей средой, с учетом предварительного наводороживания материала и градиента поля механических напряжений в этой зоне. Выявлено, что наводороживание материала и вызванный в нем около вершины трещины при нагрузке градиент гидростатической компоненты тензора механических напряжений могут создать концентрацию водорода в несколько раз больше, чем во внешней среде. Проведены экспериментальные исследования и определена локальная концентрация водорода в зоне предразрушения в образцах из стали 09Г2С.

*SUMMARY.* A closed-form solution of the problem of hydrogen diffusion in the process zone at the crack tip that contacts outside with hydrogen-containing environment was constructed analytically with account of material pre-hydrogenation and a gradient of the mechanical stresses field in this zone. The obtained solution shows that pre-hydrogenation of the material and a gradient of hydrostatic component of mechanical stress tensor caused in the material at the crack tip under loading can give hydrogen over-saturation in this zone with a level of concentration several-fold higher than in the external environment. The experimental investigations were performed and local hydrogen concentration in the process zone in 09Г2С steel specimens was determined.

1. *Андрейків О. Є., Гембара О. В.* Механіка руйнування та довговічність металічних матеріалів у водневмісних середовищах. – К.: Наук. думка, 2008. – 344 с.
2. *Панасюк В. В.* Механіка квазіхрупкого розрушення матеріалів. – К.: Наук. думка, 1991. – 416 с.
3. *Сегрегация* водорода и кислорода в зоне разрушения лопаток паровой турбины высокого давления / О. Д. Смиян, Г. М. Григоренко, А. Б. Вайнман, Е. И. Буткова // Материалы Пятой междунар. конф. “ВОМ-2007”, 21–25 мая 2007 г. – Донецк, 2007. – Т. 2. – С. 806–810.
4. *Sofronis P. and McMeeking R. M.* Numerical analysis of hydrogen transport near a blunting crack tip // J. Mech. Phys. Solids. – 1989. – **37**, № 3. – P. 317–350.
5. *Krom A. H. M., Koers R. W. J., and Bakkerr A.* Hydrogen transport near a blunting crack tip // Ibid. – 1999. – **47**, № 4. – P. 971–992.
6. *Wang M., Akiyama E., and Tsuzaki K.* Determination of the critical hydrogen concentration for delayed fracture of high strength steel by constant load test and numerical calculation // Corr. Sci. – 2006. – **48**, № 8. – P. 2189–2202.
7. *Андрейків О. Є., Гембара О. В.* Ріст тріщин у металах під дією водню та довготривалого статичного навантаження // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2005. – № 3. – С. 29–33. (*Andreikiv O. E. and Hembara O. V.*, Propagation of Cracks in Metals under the Action of Hydrogen and Long-Term Static Loading // Materials Science. – 2005. – № 3. – P. 309–315.)
8. *Карслоу Г., Егер Д.* Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 488 с.

Одержано 30.04.2010