

УДК:620.197.5^669.788

РОЗПОДІЛ КОНЦЕНТРАЦІЇ ВОДНЮ В КОМПАКТНОМУ ЗРАЗКУ ЗА ЕЛЕКТРОЛІТИЧНОГО НАВОДНЮВАННЯ

О. Я. ЧЕПІЛЬ, І. П. ШТОЙКО

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

Запропонована розрахункова модель для визначення розподілу концентрації водню в компактному зразку за електролітичного наводнювання. Зразок змодельовано паралелепіпедом, протилежна до вершини тріщини поверхня якого на певну глибину занурена в електроліт, з допомогою рівняння Фіка з початковими і граничними умовами. На зануреній поверхні задана постійна концентрація водню, а на іншій – нульова. Модель реалізовано методом скінченних елементів і визначено розподіл концентрації водню в паралелепіпеді за геометрією і часом.

Ключові слова: концентрація водню, електролітичне наводнювання, компактний зразок, рівняння Фіка, метод скінченних елементів.

Вступ. В елементах різних конструкцій, які контактують з воденьвмісними середовищами і піддані силовим навантаженням, утворюються воднево-механічні тріщини, що призводять до їх руйнування, а отже, до масштабних аварій та екологічних катастроф. Тому необхідні методи оцінки їх залишкового ресурсу.

Сьогодні відомі [1–9] результати експериментальних та теоретичних досліджень руйнування металевих матеріалів за дії воденьвмісного середовища. Для вивчення впливу водню на їх механічні і міцнісні властивості, особливо на тріщиностійкість за довготривалих статичних чи циклічних навантажень, слід розробити відповідні методики, побудовані на силових схемах деформування і руйнування зразків з тріщинами у камерах з воднем за контрольованого тиску. Для їх реалізації вибирають компактні зразки з відповідно навантаженою, електролітично наводненою і протилежною до тріщини поверхнею, а також водневі камери (рис. 1) [6]. Визначають розподіл концентрації водню в зразку, який дифундує назустріч руху контуру тріщини.

Досліджували паралелепіпедоподібний зразок (рис. 2a) розмірами 30×50×5 mm, занурений на 5 mm у воденьвмісне середовище. Щоб використати метод скінченних елементів, зразок розбивали на 9000 восьмигранних елементів (рис. 2b). Задачу розв'язували за допомогою програмного пакета MSC Marc Mentat 2014.0.0. Вважали, що починаючи із точки O (рис. 2a), з часом зароджуватиметься тріщина і визначали зміну концентрації водню в її околі. Для цього використовували рівняння Фіка [10–13]

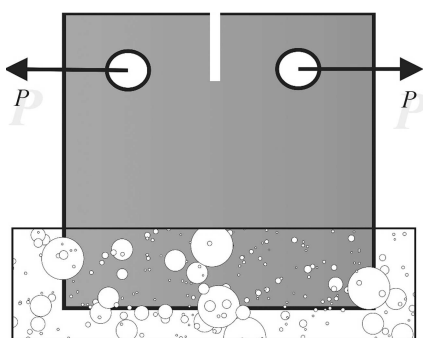


Рис. 1. Схема розтягу компактного зразка за електролітичного наводнювання.

Fig. 1. Scheme of a compact sample tension for electrolytic hydrogenation.

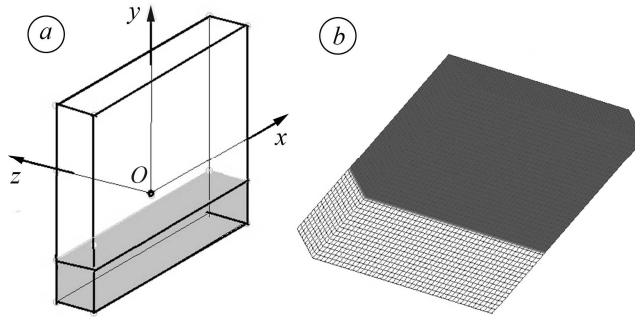
$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla(D(T)\nabla C) - \nabla\left(\frac{DV_H}{RT}\nabla\sigma_h\right), \quad (1)$$

з крайовими та початковою умовами

$$C(y \in [0, y_1], t) = K_S(T) \cdot \sqrt{p}, \quad C(y, t=0) = 0, \quad (2)$$

де температурні залежності коефіцієнтів дифузії D та розчинності водню K_S для трубчастої сталі Х60 визначені раніше [1, 14–16].

Рис. 2. Розрахункова схема наводненого зразка (а) із розбиттям на скінченні елементи (b).
Fig. 2. Calculation scheme of the sample hydrogen saturation (a) with finite element splitting (b).



За отриманими результатами знайшли розподіл концентрації водню за товщиною (рис. 3a) та шириною зразка (рис. 3b) у момент досягнення максимального ступеня наводнювання на рівні досліджуваної точки. Виявили, що максимальна концентрація в цій точці досягається після 180 h наводнювання (рис. 4.) Після апроксимації розрахункових даних за допомогою програмного пакета Wolfram Mathematica 10 встановили степеневу залежність зміни відносної концентрації водню по товщині

$$C_H = C_H^0(0,066 \cdot z + 3,15 \cdot z^2 - 5,02 \cdot z^3 + 3,25 \cdot z^4 - 0,97 \cdot z^5 + 0,11 \cdot z^6) \quad (3)$$

та ширині

$$C_H = C_H^0(48,74 \cdot x^2 - 186,8 \cdot x^3 + 187 \cdot x^4 - 1,03 \cdot x) \quad (4)$$

зразка, а також залежність її зміни з часом в околі точки O :

$$C_H = C_H^0(4,89 \cdot 10^{-4} \cdot t + 6,19 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 3,37 \cdot 10^{-7} \cdot t^3 + 4,34 \cdot 10^{-10} \cdot t^4 + 2,03 \cdot 10^{-4} \cdot t^5 - 5,96 \cdot 10^{-3}). \quad (5)$$

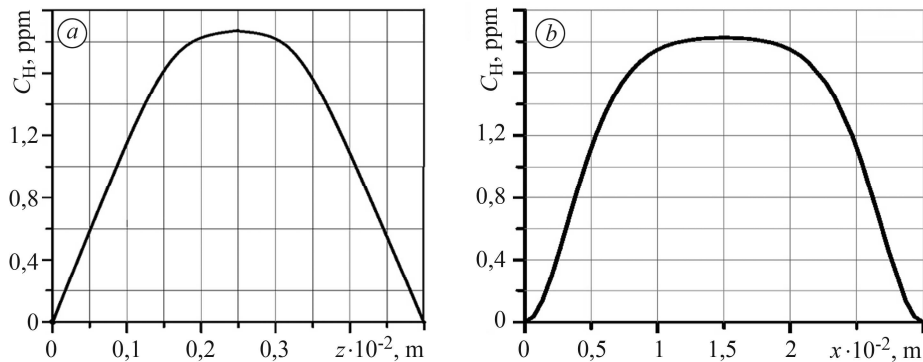


Рис. 3. Розподіл концентрації водню після 180 h наводнювання: а – по товщині зразка; б – по ширині.

Fig. 3. Distribution of hydrogen concentration after 180 h of hydrogenation: a – along the sample thickness; b – along its width.

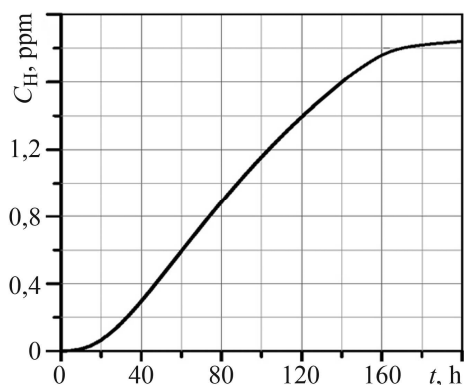


Рис. 4. Залежність концентрації водню від часу у точці *O* (див. рис. 2).

Fig. 4. Dependence of the hydrogen concentration on time at point *O* (see Fig. 2).

концентрации водорода в компактном образце при электролитическом наводороживании. Компактный образец смоделирован параллелепипедом, противоположная к вершине трещины поверхность которого погружена на определенную глубину в электролит, с помощью уравнения Фика с начальными и граничными условиями. На погруженной поверхности задана постоянная концентрация водорода, а на другой – нулевая. Математическую модель реализовано методом конечных элементов и определено распределение концентрации водорода в параллелепипеде по геометрии и времени.

SUMMARY. A computational model is proposed for determining the distribution of hydrogen concentration in a compact sample under its electrolytic hydrogenation. In this case the compact sample is modeled by a parallelepiped, which is immersed for a certain depth opposite to the crack tip in the electrolyte, through which its electrolytic hydrogenation passes. The mathematical model used is the Fick equation with initial and boundary conditions, where a constant concentration of hydrogen is set on the immersed surface of the parallelepiped, while on the other it is zero. Such a mathematical model is realized by the finite element method and the distribution of the hydrogen concentration in the parallelepiped is determined by geometry and time.

1. Андрейків О. Є., Скальський В. Р., Гембара О. В. Метод оцінки високотемпературного водневого руйнування біметалевих елементів конструкцій // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2000. – **36**, № 4. – С. 15–22.
(*Andreikiv O. E., Skal's'kyi V. R., and Gembara O. V. Method for the investigation of high-temperature hydrogen-assisted fracture of bimetallic structural elements // Materials Science. – 2000. – 36, № 4. – P. 489–498.*)
2. Panasyuk V., Ivanytskyi Ya., and Hembara O. Assessment of hydrogen effect on fracture resistance under complex-mode loading // Eng. Frac. Mech. – 2012. – **83**. – P. 54–61.
3. Гембара О. В., Андрейків О. Є. Вплив наводнювання стінок нафтових та газових трубопроводів на їх ґрунтового корозію і довговічність // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – **47**, № 5. – С. 27–34.
(*Hembara O. V. and Andreikiv O. E. Effect of hydrogenation of the walls of oil-and-gas pipelines on their soil corrosion and service life // Materials Science. – 2012. – 47, № 5. – P. 598–607.*)
4. Визначення концентрації водню у зоні передруйнування біля вершини тріщини / Я. Л. Іваницький, О. В. Гембара, О. Д. Сміян, М. Ковалік // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – **46**, № 6. – С. 51–55.
(*Evaluation of the concentration of hydrogen in the process zone near the crack tip / Ya. L. Ivanyts'kyi, O. V. Hembara, O. D. Smiyan, M. Kowalik // Materials Science. – 2011. – 46, № 6. – P. 769–774.*)

Формули (3)–(5) придатні для експериментальних досліджень залежності характеристик статичної і циклічної тріщиностійкості металевих матеріалів від концентрації водню.

ВИСНОВКИ

Методом скінченних елементів розв'язана задача про розподіл концентрації водню в компактному зразку за електролітичного наводнювання. Вважали, що протилежна вершині тріщини поверхня компактного зразка занурена в електроліт. Побудовані наближені формули для визначення розподілу концентрації водню в компактному зразку за геометрією і часом.

РЕЗЮМЕ. Предложена расчетная модель для определения распределения кон-

5. *Розрахунок залишкової довговічності тривало експлуатованої ділянки магістрального газопроводу / О. Є. Андрейків, О. В. Гембара, О. Т. Цирульник, Л. І. Ниркова // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – 48, № 2. – С. 103–110.*
(*Evaluation of the residual lifetime of a section of a main gas pipeline after long-term operation / O. E. Andreikiv, O. V. Hembara, O. T. Tsyruľnyk, L. I. Nyrkova // Materials Science. – 2012. – 48, № 2. – P. 231–238.*)
6. *Андрейків О. Є., Іваницький Я. Л. Методологічні аспекти оцінки характеристик тріщиностійкості матеріалу у водневому середовищі під сталим та циклічним навантаженням // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1998. – 34, № 4. – С. 5–20.*
(*Andreikiv O. E. and Ivanys'kyi Ya. L. Methodological aspects of evaluation of the characteristics of crack-growth resistance of materials in hydrogen environments under sustained and cyclic loading // Materials Science. – 1998. – 34, № 4. – P. 447–468.*)
7. *Вплив напружено-деформованого стану на розподіл концентрації водню у зоні передруйнування / В. В. Панасюк, Я. Л. Іваницький, О. В. Гембара, В. М. Бойко // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – 50, № 3. – С. 7–14.*
(*Influence of the stress-strain state on the distribution of hydrogen concentration in the process zone / V. V. Panasyuk, Ya. L. Ivanys'kyi, O. V. Hembara, V. M. Boiko // Materials Science. – 2014. – 50, № 3. – P. 315–323.*)
8. *Кроншталь О. В., Харин В. С. Влияние неоднородности материалов и теплосмен на диффузию водорода как фактор риска развития водородной деградации металлов // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1992. – 28, № 6. – С. 7–20.*
(*Kronshtal' O. V. and Kharin V. S. Effect of heterogeneity of materials and heat cycles on diffusion of hydrogen as a factor of the risk of development of hydrogen degradation of metals // Soviet Materials Science. – 1992. – 28, № 6. – P. 475–486.*)
9. *Андрейків О. Є., Сас Н. Б. Докритичний ріст плоскої тріщини в тривимірному тілі за високотемпературної повзучості // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – 44, № 2. – С. 19–26.*
(*Andreikiv O. E. and Sas N. B. Subcritical growth of a plane crack in a three-dimensional body under the conditions of high-temperature creep // Materials Science. – 2008. – 44, № 2. – P. 163–174.*)
10. *Гембара О. В. Скінченно-елементне моделювання масопереносу в структурно-неоднорідних матеріалах // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2003. – 39, № 5. – С. 89–95.*
(*Gembara O. V. Finite-element simulation of mass transfer in structurally inhomogeneous materials // Materials Science. – 2003. – 39, № 5. – P. 712–720.*)
11. *Гембара О. В., Терлецька З. О., Чепіль О. Я. Концентрація водню біля вершини корозійної тріщини // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – 44, № 1. – С. 109–111.*
(*Gembara O. V., Terlets'ka Z. O., and Chepil' O. Ya. Hydrogen concentration near the tip of a corrosion crack // Materials Science. – 2008. – 44, № 1. – P. 133–137.*)
12. *Гембара О. В., Терлецька З. О., Чепіль О. Я. Визначення електричних полів у системі електроліт–метал // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – 43, № 2. – С. 71–77.*
(*Hembara O. V., Terlets'ka Z. O., and Chepil' O. Ya. Determination of electric fields in electrolyte–metal systems // Materials Science. – 2007. – 43, № 2. – P. 222–229.*)
13. *Гембара О. В., Чепіль О. Я., Гембара Н. Т. Вплив параметрів дискретизації на точність числового розв'язку тривимірної задачі дифузії водню // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – 52, № 2. – С. 119–123.*
(*Hembara O. V., Chepil' O. Ya., 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.*)
14. *Андрейків О. Є., Сас Н. Б. Механіка руйнування металевих пластин за високотемпературної повзучості // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – 42, № 2. – С. 62–68.*
(*Andreikiv O. E. and Sas N. B. Fracture mechanics of metallic plates under the conditions of high-temperature creep // Materials Science. – 2006. – 42, № 2. – P. 210–219.*)
15. *Panasyuk V. V., Andreikiv O. E., and Stadnik M. M. Elastic equilibrium of unlimited body with a fine inclusion // Доп. АН УРСР. Сер. А: Фіз.-мат. та техн. науки. – 1976. – № 7. – С. 636–639.*
16. *Panasyuk V. V., Andreykiv O. Y., and Ritchie R. O. Estimation of the effects of plasticity and resulting crack closure during small fatigue crack growth // Int. J. of Fract. – 2001. – № 2. – С. 99–115.*

Одержано 27.02.2018