

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ ТРІЩИН ДЛЯ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ У СЕРЕДОВИЩІ ВОДНЮ

Владислав Воробець
Тарас Гембара., канд. техн. наук, доцент,
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

Анотація. Досліджуючи вплив водневого середовища на конструктивні сталі енергетичного обладнання важливо мати дані про тріщиноутворення, розвиток тріщин, залежно від концентрації водню. Відсутність таких даних, або недостовірність може привести до катастрофічних руйнувань, викликаних водневою деградацією матеріалу. Розглянуто математичне моделювання розвитку таких тріщин, отримано залежність швидкості росту тріщини від її розкриття.

Ключові слова: водень, сталь, тріщина, ріст, швидкість, концентрація, деградація.

MATHEMATICAL SIMULATION OF DEVELOPMENT OF CRACKS FOR THE SAFE OPERATION OF ELEMENTS OF STRUCTURES IN A HYDROGEN ENVIRONMENT

Vladyslav Vorobets
Taras Hembara, Doctor Ph., Associate Professor,
Lviv State University of Life Safety

Abstract. When studying the effect of a hydrogen environment on structural steels of power equipment, it is important to have data on crack formation and crack development, depending on the concentration of hydrogen. The lack of such data, or its inaccuracy, can lead to catastrophic destruction caused by hydrogen degradation of the material. Mathematical modeling of the development of such cracks was considered, the dependence of the crack growth rate on its opening was obtained.

Key words: hydrogen, steel, crack, growth, speed, concentration, degradation.

Розглянемо пружнопластичне ізотропне тіло, яке містить макротріщину довжиною l (рис.1) і піддане дії розтягувальних напружень p і воденьвмісного середовища, яке створює біля вершини тріщини концентрацію водню C_S .

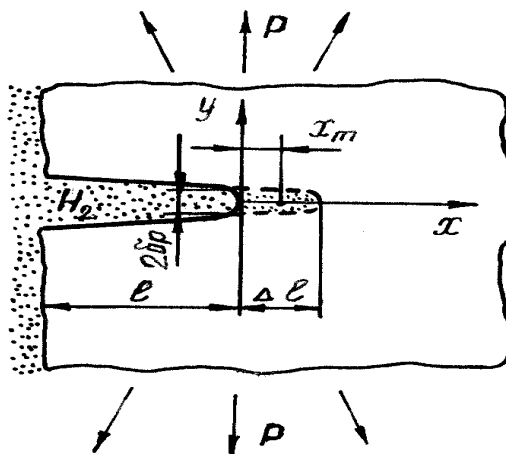


Рисунок 1 – Елемент конструкції з макротріщиною в середовищі водню.

Згідно експериментальних даних [1] воднева макротріщина росте послідовними стрибками. Пов'язано це з тим, що при навантаженні тіла з тріщиною в околиці її вершини формуються передвісники дислокацій руйнування, проходить накопичення водню і утворення мікротріщини. З'єднання мікротріщини з магістральною означає здійснення акту підростання макротріщини. Подальший її ріст буде зупинений на деякій відстані від первинного положення її вершини областю металу, не насиченого ще достатньо воднем. В околі кінця новоутвореної

період $\Delta t = t_*$ здійснення циклу формування передумов руйнування – накопичення водню – утворення мікротріщини буде періодом повторення стрибків, який разом з їхньою середньою довжиною $\Delta l = x_*$ визначатимуть середню макроскопічну швидкість поширення магістральної тріщини

$$v = \frac{x_*}{t_*} \quad (1)$$

Для цього випадку рівняння балансу швидкостей [2–3] запишеться у вигляді

$$\frac{\partial l}{\partial t} = \frac{B \sigma_0 \int_0^{l_p} \frac{\partial C_H(x,t)}{\partial t} \Big|_{t=t_*} dx}{\gamma_0 - \gamma_p}, \quad (2)$$

де l_p - довжина пластичної зони в околі вершини тріщини; γ_0 - енерговитрати, віднесені на одиницю площі новоутвореної поверхні тріщини; C_H - концентрація водню в елементі, $\gamma_p = \sigma_0 \delta$ - питома енергія пластичних деформацій при статичному навантаженні; δ - розкриття вершини тріщини при навантаженні; σ_0 - усереднені нормальні напруження, що виникають в зоні передруйнування, B - стала (визначають з експерименту). Питома енергію руйнування представимо у вигляді $\gamma_0 = \sigma_0 \delta_c$, де δ_c - критичне розкриття вершини тріщини. У результаті отримали рівняння для визначення швидкості росту водневої тріщини

$$\frac{\partial l}{\partial t} = \frac{B \int_0^{l_p} \frac{\partial C_H(x,t)}{\partial t} \Big|_{t=t_*} dx}{\delta_c - \delta}. \quad (3)$$

Концентрацію водню в зоні передруйнування згідно [2] визначаємо зі співвідношення

$$C(x,t) = \frac{2C_S \sqrt{\tau} \exp[2m\xi - (4\tau)^{-1} \xi^2]}{\xi \sqrt{\pi} \exp m\xi + 2\sqrt{\tau} \exp(-0.25\xi^2 \tau^{-1})}, \quad (4)$$

де $\xi = x(2\delta)^{-1}$; $\tau = Dt/(2\delta)^2$; $m = 0,9\sigma_T V_H / RT$; D - коефіцієнт дифузії водню в метали; V_H - парціальний молярний об'єм водню в метали; R - універсальна газова постійна.

Далі необхідно визначити середню довжину x_* стрибка тріщини. Встановлено [1], що найбільш чутливими до впливу водню є деформаційні характеристики. В деяких випадках деформаційні параметри різко зменшуються при збільшенні концентрації водню в метали. Тому скористаємося деформаційним критерієм міцності для встановлення умов локального руйнування. Вважаємо, що за час t_* тріщина підросте на величину x_* , якщо при заданому навантаженні в точці $x = x_*$ буде виконуватися рівність

$$\varepsilon(x_*, p) = \varepsilon_c(p) - BC(x_*, t_*), \quad (5)$$

де $\varepsilon_c(p)$ - граничне значення деформації матеріалу при його руйнуванні без впливу водню. Деформацію в зоні передруйнування як в наводненому, так і ненаводненому матеріалі визначаємо через розкриття δ тріщини, тобто вважаємо, що

$$\varepsilon(x_*, p) = \delta/h, \quad \varepsilon_c(p) = \delta_c/h, \quad (6)$$

де h - деякий коефіцієнт пропорційності.

Тоді з врахуванням (1), (5), (6) отримуємо умову для визначення x_*

$$1 - \frac{\delta}{\delta_c} = \alpha C \left(x_*, \frac{x_*}{\nu} \right), \quad (7)$$

де $\alpha = \frac{Bh}{\delta_c}$. Після математичних перетворень отримали:

$$x_* \approx \frac{8\alpha C_S D \delta_c \lambda (1 - \lambda) + 4D\alpha^2 C_S^2 \delta_c \lambda + 4D\delta_c \lambda (1 - \lambda)^2}{8\alpha^2 C_S^2 D m + 8\alpha C_S D m (1 - \lambda) + \delta_c \lambda \pi \nu (1 - \lambda)^2}, \quad \lambda = \frac{\delta}{\delta_c} \quad (8)$$

Далі враховуючи (1-6) і (8) отримали рівняння для визначення швидкості росту тріщини у вигляді

$$v = \frac{8B\alpha C_S^2 D m \delta_c \lambda (\alpha C_S + (1 - \lambda)) \left(\exp\left(\frac{m l_p}{\delta_c \lambda}\right) - 1 \right) - 8D\delta_c \lambda m (1 - \lambda) (2\alpha C_S (1 - \lambda) + (1 - \lambda)^2 + \alpha^2 C_S^2)}{32\alpha C_S m^2 a \delta_c \lambda (1 - \lambda) (\alpha C_S + (1 - \lambda)) - B C_S \delta_c^2 \lambda^2 \pi (1 - \lambda)^2 \left(\exp\left(\frac{m l_p}{\delta_c \lambda}\right) - 1 \right)} \quad (9)$$

Для практичного використання даного рівняння необхідно мати значення $\delta_c, \alpha, B, D, C_S, m$ для розглядуваної системи метал-водень. Ці величини знаходять з експериментів по визначенню залежності швидкості росту тріщини в наводненому металі від рівня навантаження матеріалу біля вершини тріщини, який визначається значеннями δ . Для верифікації розрахункових даних співставлені залежності ν від δ обчислені згідно співвідношення (9) і експериментальні дані для сталі 4147. Для цієї сталі встановлено $\delta_c = 0,89 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, $D = 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$, $\sigma_T = 869 \text{ МПа}$, $K_{Ic} = 160 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, $m = 0,6528$. Величини B і α визначали шляхом обробки експериментальних даних за допомогою методу найменших квадратів. В результаті розрахунків встановили, що $B C_S = 3,568$, $\alpha C_S = 1,485$, різниця між експериментальними і розрахунковими даними в межах від 5 до 10 відсотків залежно від ділянки росту тріщини.

Розглянута розрахункова математична модель дає можливість визначати кінетику водневої тріщини. Встановлено важливі фактори впливу на швидкість росту втомної тріщини, а саме необхідність врахування неоднорідності розподілу концентрації водню. Неруйнівний характер розрахункових методів, які не вимагають виготовлення спеціальних зразків в натуральну величину для досліджень, дорогої апаратури спостереження, дозволяє налагодити суцільний контроль на будь-яких стадіях експлуатації конструктивних елементів.

Список літератури

1. Clark W.G. Effect of Temperature and Pressure on Hydrogen Cracking in High Strength Type 4340 Steel // J. Materials for Energy Systems. – 1999. - №1. – P. 33-40.
2. Hembara O., Chepil O., Hembara T., Mochulskiy V., Sapuzhak Ya. Influence of temperature and hydrogen on fatigue fracture of 10kh15n27t3v2mr steel / Journal of Theoretical and Applied Mechanics. – Warsaw 2020 – 58, 1. – P. 3-15, DOI: 10.15632/jtam-pl/115214.
3. M. Dutkiewicz, O. Hembara, O. Chepil, M. Hrynenko and T. Hembara. A New Energy Approach to Predicting Fracture Resistance in Metals // Materials (Basel, Switzerland), 2023. -16, 1566.