

УДК 669.778

РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ РОСТУ ТРІЩИН В ЕЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦІЙ В УМОВАХ ВПЛИВУ ВОДНЮ ТА СКЛАДНОГО НАПРУЖЕНОГО СТАНУ

О. Гембара

Канд. техн. наук,
Фізико-механічний інститут
ім. Г. В. Карпенка НАН України,
м. Львів

Пропонується розрахункова модель росту тріщин в елементах конструкцій за складного напруженого стану у водневмістному середовищі. На базі енергетичного критерію руйнування отримано кінетичні рівняння, що дозволяють оцінювати кінетику поширення водневої тріщини в залежності від параметрів навантаження, геометричних розмірів тріщини і фізико-хімічних та міцнісних характеристик матеріалу, залишковий ресурс працюючих у водні елементів конструкцій, допустимі розміри виявлених дефектів з точки зору їх водневого руйнування і заданого ресурсу.

тріщина, водень, складний напружений стан, довговічність

Відомо [1— 5], що руйнування металів в умовах дії водневмістних середовищ і довготривалого статичного чи циклічного навантажень проходить шляхом зародження і уповільненого росту воднево-механічних тріщин. Тому кінетика такого сповільненого руйнування визначається кінетикою росту воднево-механічних тріщин.

У зв'язку з цим, досліджуючи поширення тріщин у металах, що взаємодіють з воднем, велику увагу приділяють побудові залежностей швидкості їх росту da/dt від коефіцієнта інтенсивності напружень K_I і концентрації водню C_H біля їхніх контурів. За допомогою таких залежностей можна визначити кінетику воднево-механічної тріщини, ресурс деталі у водневому середовищі, допустимі розміри дефектів, а також інші важливі для оцінювання працездатності конструкції параметри. Однак, відомі підходи придатні тільки для одного виду навантаження, а саме — розтягу. Для тривісного навантаження і дії водню на сьогодні невідомі розробки для встановлення кінетики росту таких тріщин.

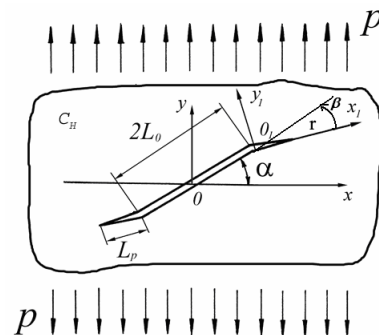


Рис. 1. Схема навантаження пластины з тріщиною

Далі пропонується енергетичний підхід для побудови таких залежностей у випадках газоподібного водню та складного довготривалого статичного навантаження.

Встановлення кінетичних рівнянь. Розглянемо металеву пластину (рис. 1), яка послаблена центральною

тріщиною і піддана дії довготривалих статичних навантажень.

Вважається, що тріщина поширюється по прямій, яка направлена до початкової лінії розміщення тріщини під кутом β , а біля її контуру виникає складний напружено-деформований стан, який характеризується коефіцієнтами інтенсивності напружень K_I, K_{II} . Крім цього, газоподібний водень поступає під тиском P у тріщину і створює на поверхні її вершини концентрацію C_0 .

Задача полягає у встановленні рівнянь, які будуть описувати кінетику поширення водневої тріщини і визначати період її докритичного росту t_d .

Розв'язок такої задачі знаходимо на основі сформульованого в роботі [5] енергетичного принципу, завдяки якому отримали рівняння для визначення швидкості зумовленого воднем росту тріщини:

$$V = \frac{\partial l}{\partial t} = \frac{\gamma_H(\beta)}{\gamma_c - \gamma_p}, \quad (1)$$

де $\partial l / \partial t$ — швидкість поширення тріщини; γ_p — питома енергія пластичного деформування у зоні передруйнування біля вершини тріщини, що залежить тільки від її розміру і зовнішнього силового навантаження; γ_H — питома енергія пластичного деформування у зоні передруйнування біля вершини тріщини, яка виділяється за сталого розміру тріщини під час інкубаційного періоду насичення воднем зони передруйнування і підготовки її стрибка, та залежить тільки від часу і концентрації водню; γ_c — питома енергія руйнування під час поширення тріщини.

Оскільки вважаємо, що тріщина розвивається у напрямку максимально можливої швидкості, тобто $\partial V / \partial \beta = 0$, то з рівняння (1) отримаємо друге кінетичне рівняння для визначення напрямку її поширення:

$$\frac{\partial}{\partial \beta} \left\{ \frac{\gamma_H(\beta)}{\gamma_c - \gamma_p(l, \beta)} \right\} \bigg|_{\beta=\beta_*} = 0. \quad (2)$$

Для повноти математичної моделі до рівнянь (1), (2) додамо крайові умови:

$$l(t=0) = l_0, \quad l(t_*) = l_*, \quad (3)$$

де критичну довжину тріщини l_* визначаємо з енергетичного критерію

$$\gamma_p(l_*) = \gamma_c. \quad (4)$$

Отже, кінетичні рівняння (1), (2) та умови (3), (4) утворюють розрахункову модель докритичного росту тріщини за складного напруженого стану у водневмістному середовищі.

Питома енергію пластичного деформування у зоні передруйнування біля вершини тріщини, яка залежить тільки від її розміру і зовнішнього силового навантаження запишемо так:

$$\gamma_p = \sigma_0 \delta_{Ip}(x_1) + \tau_0 \delta_{IIp}(x_1), \quad (5)$$

де σ_0 і τ_0 — усереднені нормальні і дотичні напруження в зоні передруйнування [5]; δ_{Ip} і δ_{IIp} — відповідно розкриття та зміщення берегів тріщини.

Питома енергію пластичного деформування у зоні передруйнування біля вершини тріщини, яка виділяється за сталого розміру тріщини під час інкубаційного періоду насичення воднем зони передруйнування і підготовки її стрибка, та залежить тільки від часу і концентрації водню, представимо у вигляді [5]

$$\gamma_H = (A_1 \sigma_0 + A_2 \tau_0) \int_0^{L_p^{(H)}} \frac{\partial C_H(x_1, \beta, t)}{\partial t} \bigg|_{t=t_*} dx_1, \quad (6)$$

де $L_p^{(H)}$ — довжина пластичної зони; A_1, A_2 — константи, що визначаються експериментально; C_H — концентрація водню в зоні передруйнування, яка обчислюється згідно [8]; t_* — момент старту тріщини, який визначається з рівняння

$$\delta_c^{(H)} = \delta_c - BC_H(x_*, \beta_*, t_*), \quad (7)$$

де $x_* \approx \alpha \delta$; α, B — константи, які визначаються експериментально [8].

Питома енергію руйнування під час поширення тріщини подамо так:

$$\gamma_c = \sigma_0 \delta_{Ic}^{(H)} + \tau_0 \delta_{IIc}^{(H)}, \quad (8)$$

де $\delta_{Ic}^{(H)}, \delta_{IIc}^{(H)}$ — критичні значення розкриття та поперечного зсуву у пластичній зоні біля вершини тріщини, при одночасному досягненні яких відбувається руйнування елемента конструкції.

У результаті отримали

$$\frac{dl}{dt} = \frac{(A_1 \sigma_0 + A_2 \tau_0) \int_0^{L_p^{(H)}} \frac{\partial C_H(x_1, \beta, t)}{\partial t} \bigg|_{t=t_*} dx_1}{(\sigma_0 \delta_{Ic}^{(H)} + \tau_0 \delta_{IIc}^{(H)}) - \int_0^{L_p^{(H)}} [\sigma_0 \delta_{Ip}(x_1) + \tau_0 \delta_{IIp}(x_1)] dx_1}. \quad (9)$$

Для зручності застосування описаної моделі до розв'язування конкретних задач визначимо енергію деформацій, що входять у визначальне рівняння (1) через параметри лінійної механіки руйнування — КІН для автотельної тріщини. Для цього наближено подамо розкриття і зміщення берегів тріщини в точках модельної пластичної зони довжиною $L_p^{(H)}$ попереду вершини водневої тріщини квадратичними залежностями [2]:

$$\begin{aligned} \delta_{Ip} &= \delta_{Ip}(0) \left(1 - \frac{x}{L_p^{(H)}} \right)^2; \\ \delta_{IIp} &= \delta_{IIp}(0) \left(1 - \frac{x}{L_p^{(H)}} \right)^2, \end{aligned} \quad (10)$$

де $\delta_{lp}(0) = \frac{K_I^2}{E\sigma_0}$; $\delta_{llp}(0) = \frac{K_{II}^2}{E\tau_0}$; E – модуль Юнга,

$$L_p^{(H)} = \frac{\pi K_I^2}{8\sigma_0^2} = \frac{\pi K_{II}^2}{8\tau_0^2}. \quad (11)$$

Таким чином, підставивши співвідношення (10), (11) у (5), після нескладних математичних перетворень отримаємо вираз

$$\gamma_p = \frac{L_p^{(H)}}{3E} (K_I^2 + K_{II}^2). \quad (12)$$

Враховуючи співвідношення (7) та вирази для критичного розкриття берегів тріщини за відсутності водню:

$$\delta_{lc} = \frac{K_{lc}^2}{E\sigma_0}; \quad \delta_{llc} = \frac{K_{llc}^2}{E\tau_0} \quad (13)$$

енергію руйнування запишемо у вигляді

$$\gamma_c = \frac{1}{E} (K_{lc}^2 + K_{llc}^2) - (A_1\sigma_0 + A_2\tau_0)C_H. \quad (14)$$

З урахуванням співвідношень (12) – (14), кінетичне рівняння (1) набуде вигляду

$$\frac{dl}{dt} = \frac{(A_1\sigma_0 + A_2\tau_0) \int_0^{L_p^{(H)}} \frac{\partial C_H(x_1, \beta, t)}{\partial t} \Big|_{t=t_s} dx_1}{\frac{1}{E} (K_{lc}^2 + K_{llc}^2) - (A_1\sigma_0 + A_2\tau_0)C_H - \frac{L_p^{(H)}}{3E} (K_I^2 + K_{II}^2)} \quad (15)$$

за крайових умов (3), (4).

Апробація моделі. Розглянемо металеву пластину зі сталі 09Г2С з початковою центральною нахиленою тріщиною довжини l_0 , яка розтягується у водні ($P_H=2$ МПа; $T=293$ °K) зусиллями p . Дослідимо ріст тріщини для різних кутів її нахилу відносно лінії дії сили. Швид-

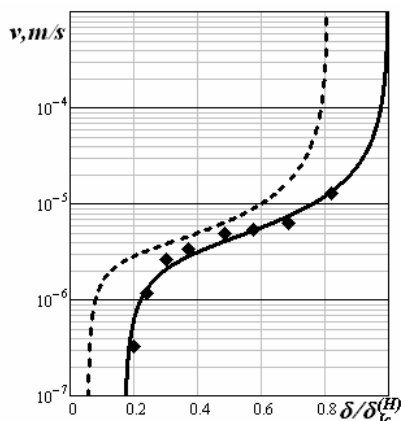


Рис. 2. Залежність швидкості росту тріщини від її розкриття: суцільна лінія — $\alpha = 0^\circ$; штрихова лінія — $\alpha = 45^\circ$; лінії – розрахунок згідно формули (9); точки – експериментальні дані для сталі A516Gr.70 [10] (позначення сталі 09Г2С за американським стандартом)

кість росту тріщини обчислювали за формулою (9), використовуючи такі експериментально визначені характеристики [8,9]: $\delta_{lc}^{(H)} = 0.6$ мм; $\delta_{llc}^{(H)} = 1.42$ мм; $A_1 = 2.745 \cdot 10^{-4}$ mm/ppm; $A_2 = 2.496 \cdot 10^{-4}$ mm/ppm; $\sigma_0 = 290$ МПа; $L_p^{(H)}(\alpha = 0^\circ) = 16$ мм; $L_p^{(H)}(\alpha = 45^\circ) = 25$ мм; $\beta_*(\alpha = 0^\circ) = 0^\circ$; $\beta_*(\alpha = 45^\circ) = 43^\circ$. На рис. 2 подано залежність швидкості росту тріщини для двох випадків: тріщина нормального відриву ($\alpha = 0^\circ$) і тріщина, розміщена під кутом $\alpha = 45^\circ$ до лінії дії сили.

Висновки. Запропоновано розрахункову модель для визначення кінетики водневої тріщини за складного напруженого стану. Застосування моделі продемонстровано на прикладі розтягу пластини з центральною довільно орієнтованою тріщиною. Коректність моделі підтверджена відомими в літературі експериментальними даними.

Література

1. Ткачов В. І. Вплив водню на властивості конструкційних сталей // Фіз.-хім.механіка матеріалів. – 2005. – №4. – С. 107–110.
2. Андрейків О.С., Гембара О.В. Ріст тріщин у металах під дією водню та довготривалого статичного навантаження // Фіз.-хім. механіка матеріалів. 2005. – №3. – С. 29–33.
3. Розрахунок елементів конструкцій водневої енергетики на міцність / А. І. Белогуров, В. С. Рачук, М. А. Рудіс та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – № 6. – С. 89–94.
4. Андрейків О.С. Никифорчин Г.М., Ткачов В.І. Міцність і руйнування металічних матеріалів і елементів конструкцій у водневмісних середовищах / Фізико-механічний інститут: поступ і здобутки / Під ред. В.В. Панасюка. – Львів: Фіз.-мех. інститут ім. Г.В. Карпенка, 2001. – 432 с.
5. Андрейків О.С., Гембара О.В. Механіка руйнування та довговічності металічних матеріалів у водневмісних середовищах. – К.: Наук. думка, 2008. – 344с.
6. Панасюк В.В. Механіка квазіхрупкого розрушення матеріалів. – К.: Наук. думка, 1991. – 416 с.
7. Саврук М.П. Механіка розрушення и прочность матеріалів: Справ.посібник: В 4 т. – К.: Наук. думка, 1988. – Т. 2. – 620 с.
8. Іваницький Я.Л., Гембара О.В., Рональд ван Дайк. Особливості руйнування пружнопластичних тіл з тріщинами за тривісного навантаження та дії водню // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2009. – № 2. – С. 40–47.
9. Гембара О.В. Гранична рівновага пластини з косою тріщиною за розтягу у водневмісному середовищі // Вісник Терн. дер. техн. ун-ту. – 2009. - №3. – С.19-23.
10. <http://www.sandia.gov/matlsTechRef/>.

Отримано 23.10.10

O. Hembara

Calculation model of the crack propagation in structural elements under hydrogen effect and under the complex stress state

Karpenko Physiko-Mechanical Institute
of National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv

A calculation model of the crack propagation in structural elements under the complex stress state in the hydrogen-containing environment is proposed. Using the energy fracture criterion kinetic equations that allow the assessing of the hydrogen crack propagation kinetics, depending on loading parameters, geometrical sizes of the crack and physicochemical and strength characteristics of the material, residual life of structural elements, operating in water, admissible sizes of the located defects from the viewpoint of their hydrogen fracture and a given life time are obtained.