

УДК 539.3:537.22:669.778

О. Гембара, канд. техн. наук

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

ГРАНИЧНА РІВНОВАГА ПЛАСТИНИ З КОСОЮ ТРІЩИНОЮ ЗА РОЗТЯГУ У ВОДНЕВМІСНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

За допомогою енергетичного підходу отримано аналітичну залежність граничного навантаження від кута нахилу тріщини та концентрації водню у зоні передруйнування за одновісного розтягу пластини з нахиленою центральною тріщиною у водні. Побудовано діаграми гранично-рівноважного стану, які дозволяють визначати деформаційні характеристики тріщиностійкості матеріалу за різних співвідношень нормальних і дотичних напружень. Експерименти, проведені на зразках зі сталі 09Г2С у водні та на повітрі з нахиленою тріщиною, підтверджують отримані аналітичні співвідношення.

Ключові слова: гранична рівновага, складне навантаження, енергетичний підхід, діаграма гранично-рівноважного стану, водень.

O. Hembara

LIMIT EQUILIBRIUM OF PLATES WITH INCLINED CRACK UNDER TENSION IN HYDROGEN-CONTAINING ENVIRONMENT

The analytical dependence of limit loading on the angle of crack inclination and hydrogen concentration in the process zone under uniaxial tension of a plate with an inclined central crack in hydrogen has been obtained using the energy approach. The diagrams of limit equilibrium state that allow us to study deformation characteristics of crack growth resistance of material at different ratios of normal and tangential stresses have been constructed. Experiments performed on 09G2C steel in hydrogen and in air with an inclined crack, prove the obtained analytical dependences.

Key words: limit equilibrium, mixed mode loading, energy approach, diagram of limit equilibrium state, hydrogen.

Практика експлуатації багатьох елементів конструкцій засвідчує, що зародження та поширення тріщин відбувається не тільки за механізму відриву, а також в умовах змішаного руйнування. Біля конструктивних концентраторів напружень у таких елементах виникає складний напружено-деформований стан. Відомо, що водень, дифундуючи у матеріал, змінює його фізико-механічні характеристики. У літературі [1,2] встановлено багато фактів, коли водень може знижувати або підвищувати характеристики тріщиностійкості за різних механізмів руйнування. Біля конструктивних концентраторів напружень відбувається перерозподіл напружень – як через дію складного навантаження, так і унаслідок впливу водневого середовища. Вплив двох конкуруючих факторів – з одного боку складного напруженого стану, що змінює умови течіння матеріалу в околі концентратора (тріщини), а з іншого боку водень, який блокує рух дислокацій і обмежує процес пластичної деформації – змінюватиме умови досягнення гранично-рівноважного стану тіла. На даний час практично немає досліджень процесу сумісного впливу водневмісного середовища та складного навантаження. Тому розроблення необхідних методів розрахунку на міцність і довговічність елементів конструкцій за складного навантаження у середовищі газоподібного водню є актуальним і важливим завданням.

Критерій руйнування

Розглянемо нескінченну ідеально пружно-пластичну пластину з центральною прямолінійною макротріщиною початкової довжини $2L_0$ із різним кутом її нахилу α до напрямку розтягальних напружень P (рис.1).

Під час навантаження такої пластини у момент досягнення гранично-рівноважного стану із вершини тріщини під кутом β підросте відросток тріщини, а на його продовженні виникне пластична зона розміром L_p . Визначимо граничні параметри зовнішнього зусилля.

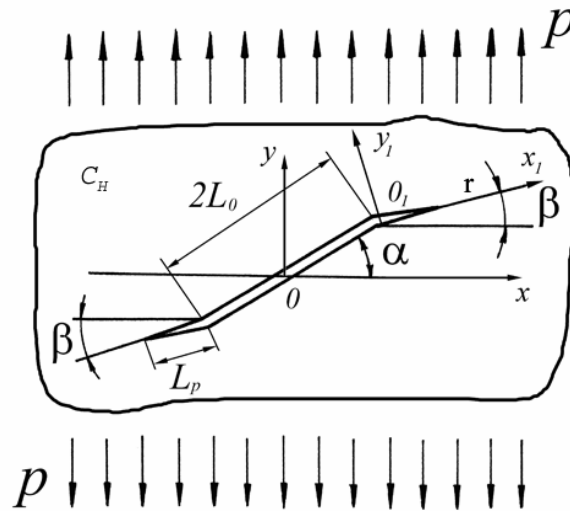


Рисунок 1 – Схема навантаження пластини з косою тріщиною

За стан граничної рівноваги пластини з тріщиною за складного навантаження та дії водню брали рівність енергії пластичних деформацій у зоні передруйнування енергії руйнування матеріалу у водні [4]:

$$W(p, L_p) \Big|_{p=p_*} = W_c, \quad (1)$$

де $W(p, L_p)$ – енергія пружно-пластичних деформацій у зоні передруйнування, обчислена на основі δ_c -моделі [3]; p – параметр пропорційного зростання компонентів зовнішніх напружень за умов складного навантаження; $p=p_*$ – граничне значення параметра p ; L_p – довжина зони передруйнування.

За одночасної реалізації механізмів руйнування I і II енергія $W(p)$ тіла у зоні передруйнування біля вершини тріщини дорівнюватиме сумі двох складових:

$$W = W_I + W_{II}. \quad (2)$$

Виразивши енергії пластичних деформацій у зоні передруйнування для кожного механізму через величину розкриву, локальне напруження та довжину пластичної зони, отримали критеріальне рівняння [5], у якому напружено-деформований стан у зоні передруйнування визначається деформаційними характеристиками:

$$\frac{\delta_I^2(p_*, \alpha, \beta_*)}{[\delta_{Ic} - A_1 C_H(\alpha, \beta_*)]^2} + \frac{\delta_{II}^2(p_*, \alpha, \beta_*)}{[\delta_{IIc} - A_2 C_H(\alpha, \beta_*)]^2} = 1 \quad (3)$$

або коефіцієнтами інтенсивності напружень:

$$\frac{K_I^4(p_*, \alpha, \beta_*)}{(K_{Ic}^2 - \lambda_1 C_H(\alpha, \beta_*))^2} + \frac{K_{II}^4(p_*, \alpha, \beta_*)}{(K_{IIc}^2 - \lambda_2 C_H(\alpha, \beta_*))^2} = 1, \quad (4)$$

де δ_I, δ_{II} – відповідно розкрив та зсув берегів тріщини за відриву і поперечного зсуву; K_I, K_{II} – коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН) відповідно за відриву та зсуву;

δ_{Ic} , δ_{IIc} , K_{Ic} , K_{IIc} – критичні значення відповідних величин за руйнування відривом і зсувом; A_i або λ_i – характеристики матеріалів, які визначають із експерименту; $C_H(\alpha, \beta)$ – концентрація водню у зоні передруйнування, яка обчислюється із розв’язку відповідної задачі дифузії водню [5].

Кут початкового поширення тріщини $\beta = \beta_*$ визначаємо з умови екстремального значення функціонала (3) або (4), тобто за формулою:

$$\frac{\partial}{\partial \beta} \left[\frac{\delta_I^2(p_*, \alpha, \beta)}{[\delta_{Ic} - A_1 C_H(\alpha, \beta)]^2} + \frac{\delta_{II}^2(p_*, \alpha, \beta)}{[\delta_{IIc} - A_2 C_H(\alpha, \beta)]^2} \right] = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial \beta} \left[\frac{K_I^4(p_*, \alpha, \beta)}{(K_{Ic}^2 - \lambda_1 C_H(\alpha, \beta))^2} + \frac{K_{II}^4(p_*, \alpha, \beta)}{(K_{IIc}^2 - \lambda_2 C_H(\alpha, \beta))^2} \right] = 0. \quad (6)$$

Якщо водню немає ($C_H = 0$), критерії (3), (4) переходять у відомі критерії [4] граничної рівноваги тіла з макротріщиною за складного навантаження.

Біля кінців відростків тріщини напружено-деформований стан визначаємо через КІН [3]:

$$K_I(\beta) = K_I^* B_{I1}(\beta) + K_{II}^* B_{I2}(\beta), \quad K_{II}(\beta) = K_I^* B_{II1}(\beta) + K_{II}^* B_{II2}(\beta), \quad (7)$$

$$\begin{aligned} 2B_{I1}(\beta) &= \cos \beta / 2 (1 + \cos \beta) (1 + 0.0051(2\beta/\pi)^4), \\ 2B_{I2}(\beta) &= 3 \cos \beta / 2 \sin \beta / 2 (1 + 0.06(2\beta/\pi)^2 + 0.064(2\beta/\pi)^4), \\ 2B_{II1}(\beta) &= 3 \cos \beta / 2 \sin \beta (1 - 0.048(2\beta/\pi)^2 + 0.033(2\beta/\pi)^4), \\ 2B_{II2}(\beta) &= \cos \beta / 2 (3 \cos \beta - 1) + 0.242(2\beta/\pi)^2 - 0.085(2\beta/\pi)^4, \end{aligned}$$

де K_I^* і K_{II}^* – КІН біля вершини тріщини без відростків:

$$K_I^* = p \sqrt{\pi d} \sin^2 \alpha, \quad K_{II}^* = p \sqrt{\pi d} \sin \alpha \cos \alpha. \quad (8)$$

Використовуючи (7) і (8), з критеріальних рівнянь (3), (5) для визначення величини руйнуючих напружень за одновісного розтягу пластини з косою тріщиною у водні отримали вираз

$$p_*(\alpha) = \left\{ \frac{(\pi l)^2 (B_{I1}(\beta_*) \cdot \sin^2 \alpha + B_{I2}(\beta_*) \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha)^4}{4 E^2 \sigma_0 (\delta_{Ic} - A_1 C_H(\alpha, \beta_*))^2} + \frac{(\pi l)^2 (B_{II1}(\beta_*) \cdot \sin^2 \alpha + B_{II2}(\beta_*) \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha)^4}{4 E^2 \tau_0 (\delta_{IIc} - A_2 C_H(\alpha, \beta_*))^2} \right\}^{-1/4}. \quad (9)$$

Рівняння (1)-(9) становлять розрахункову модель для оцінювання гранично-рівноважного стану пружно-пластичного тіла з тріщиною за умов пропорційного складного навантаження.

Аналіз результатів

Критеріальні рівняння (1)-(9) апробовані на прикладі задачі про розтяг нескінченної пластини з косою тріщиною. Щоб перевірити аналітичні співвідношення, провели експериментальні дослідження на пластинчатих взірцях, а також на

циліндричних з боковим надрізом. Характеристику K_{Ic} визначали за розтягу циліндричних зразків із зовнішньою кільцевою тріщиною [6]. Характеристику K_{IIc} визначали при випробуванні порожнинних циліндричних зразків із боковим надрізом [7]. Експериментальні дослідження проводили на пластинчатих взірцях із листової сталі 09Г2С з центральною нахилою тріщиною у середовищі водню ($C_H = K_S \sqrt{p_H} = 0,8014 \text{ ppm}$) і на повітрі за схемою розтягу з різними початковими кутами нахилу тріщини. При руйнуванні взірця реєстрували зусилля старту тріщини та встановлювали кут початкового поширення тріщини β . За результатами експериментальних випробувань [8] визначено такі характеристики сталі: $\delta_{Ic} = 0,82 \text{ мм}$, $\delta_{IIc} = 1,62 \text{ мм}$, $A_1 = 2,745 \cdot 10^{-4} \text{ мм/ppm}$, $A_2 = 2,496 \cdot 10^{-4} \text{ мм/ppm}$.

Побудовано діаграму гранично-рівноважного стану $\delta_I^* = f(\delta_{II}^*)$ за умов реалізації змішаного макромеханізму (I+II) руйнування (рис.2, кружечки – експериментальні дані, лінії – згідно з критерієм (3)) та встановлено залежність граничного навантаження від кута орієнтації початкового надрізу (рис.3, кружечки – експериментальні дані, лінії – згідно з (9)).

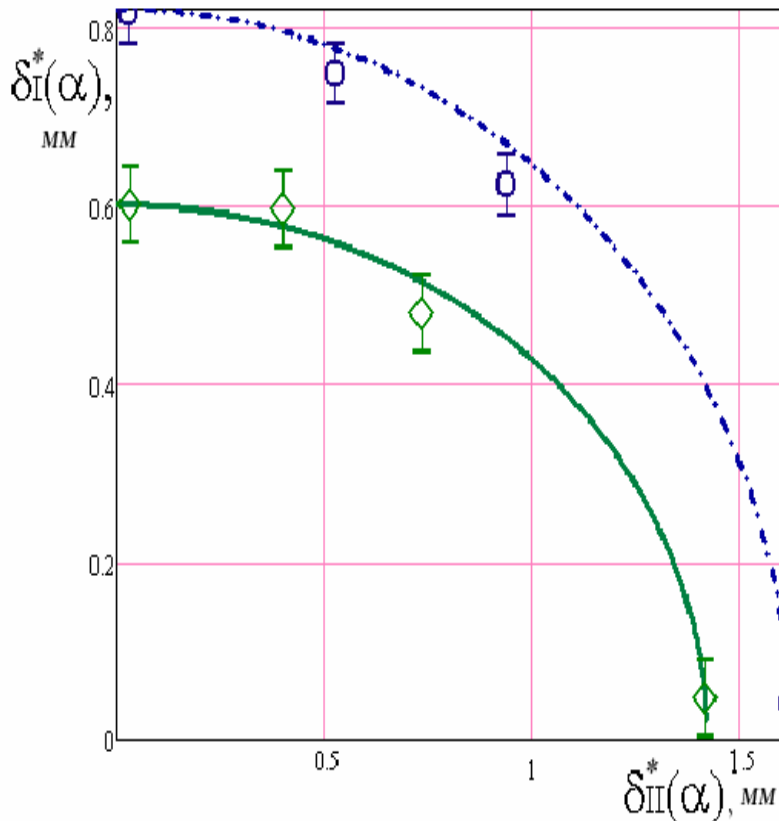


Рисунок 2 – Діаграма гранично-рівноважного стану за складного навантаження (сталь 09Г2С):
 — — — — — водень - - - - - повітря

Побудована діаграма (рис.2) дозволяє визначати деформаційні характеристики тріщиностійкості матеріалу δ_I^* і δ_{II}^* за різних співвідношень нормальних і дотичних напружень. Ці величини є характеристиками матеріалу, їх можна використовувати як паспортні значення опірності матеріалу руйнуванню для оцінювання залишкової міцності елементів конструкцій, що працюють в умовах складного напруженого стану.

Експериментальні дані узгоджуються з розрахунковими кривими, що підтверджує коректність запропонованого підходу оцінювання гранично-рівноважного стану пластини з косою центральною тріщиною.

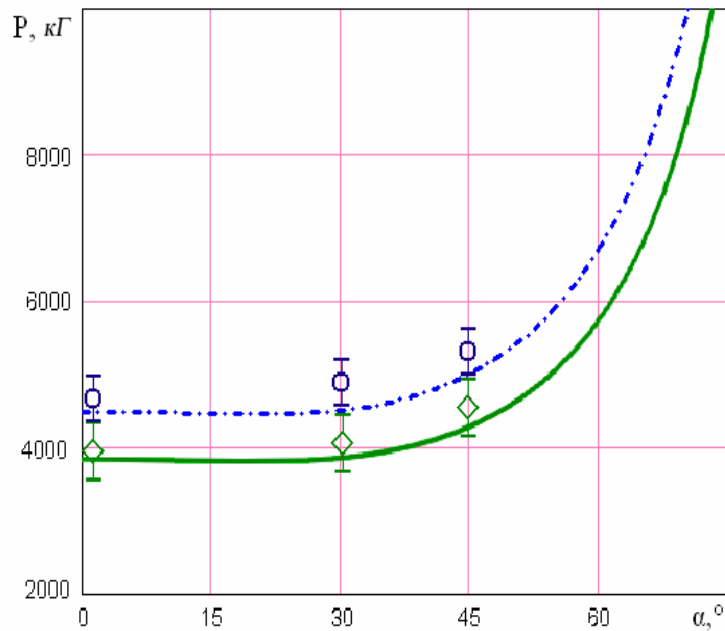


Рисунок 3 – Залежність граничного навантаження від кута нахилу тріщини (сталь 09Г2С):
 — – водень - - - – повітря

Висновки

Запропоновано методику побудови діаграм гранично-рівноважного стану та граничних навантажень для пластини з косою тріщиною за умов складного навантаження та дії водневмісного середовища. Показано, що для сталі 09Г2С водень зменшує граничне навантаження та критичні значення розкриву і зсуву берегів тріщини на 15-20% порівняно із повітрям.

Література

1. Андрейків О.Є. Механіка руйнування та довговічність металічних матеріалів у водневмісних середовищах / Андрейків О.Є., Гембара О.В. – К. : Наук. думка, 2008. – 344с.
2. Іваницький Я.Л. Влияние водорода на распространение в сталях трещин продольного сдвига / Іваницький Я.Л., Зазуляк В.А., Ваганов С.А. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 1984. – № 2. – С. 20–23.
3. Панасюк В.В. Механіка квазіхрупкого руйнування матеріалів / Панасюк В.В. – К. : Наук. думка, 1991. – 416 с.
4. Іваницький Я.Л. Гранично-рівноважний стан тіл з тріщинами за змішаних макро механізмів руйнування / Іваницький Я.Л., Андрейків А.О. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2003. – №4. – С. 12–18.
5. Іваницький Я.Л. Особливості руйнування пружнопластичних тіл з тріщинами за тривісного навантаження та дії водню / Іваницький Я.Л., Гембара О.В., Рональд ван Дайк // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2009. – № 2. – С. 40–47.
6. Штаюра С. Оцінка водневої деградації конструкційних матеріалів за двовісного навантаження / Штаюра С., Мольков Ю., Вергун І. // Машинознавство. – 2008. – № 2. – С. 44–47.
7. Іваницький Я. Оцінка опірності матеріалу руйнуванню поперечним зсувом у водні / Іваницький Я., Штаюра С., Костів Р. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2006. – Спец. вип. № 5. – С. 248–253.
8. Іваницький Я. Тріщиностійкість пластини з нахиленою тріщиною за наявності водню / Іваницький Я., Штаюра С., Мольков Ю., Ленковський Т. // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій: зб. праць / під заг. ред. Панасюка В.В. – Львів: фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2009. – С.659–664.

Одержано 12.06.2009 р.