

## ТЕОРЕТИКО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНКИ ВТОМНОГО ПОШИРЕННЯ ТРІЩИН У НАВОДНЕНИХ МАТЕРІАЛАХ

Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ, П. С. КУНЬ, С. Т. ШТАЮРА, В. М. МОЧУЛЬСЬКИЙ

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

Запропонована теоретико-експериментальна модель росту втомною тріщини у водневовмісному середовищі. В її основу покладені закономірності вичерпання енергетичних запасів матеріалу за циклічного руйнування та впливу водневовмісного середовища на механічні характеристики матеріалу. За деформаційним підходом механіки руйнування для визначення умов пружно-пластичного деформування матеріалу біля вершини тріщини отримано аналітичні залежності. Враховано ефекти закриття тріщини та асиметрію циклу навантаження. Оцінено взаємодію різних явищ, спричинених воднем, та їх загальний вплив на зміну швидкості росту втомною тріщини. Порівняно розрахункові значення швидкості росту втомною тріщини з експериментальними за різних умов для двох типів сталей.

**Ключові слова:** пружно-пластичне тіло, втомна тріщина, водневовмісне середовище, деформаційна модель, енергетичний критерій руйнування.

Довговічність елементів конструкцій, що працюють у водневовмісних середовищах, оцінюють за кінетичними діаграмами втомною руйнування [1–4], які уможливають дослідження росту втомною тріщини у відповідних експлуатаційних умовах. Відомі моделі та методики [2–4] регламентують порядок побудови залежностей швидкості росту тріщини від коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН). Внаслідок взаємодії водню з пластично деформованим металом змінюються пластичність та міцність [5], що впливає на деформування та руйнування. Оцінка опірності матеріалу руйнуванню з використанням деформаційного критерію [3, 4] далеко неповна. Нижче спробуємо врахувати комплексну дію водню на зміну міцнісних і деформаційних властивостей матеріалу за пружно-пластичного деформування та встановити аналітичну залежність для опису втомною руйнування матеріалу у водні.

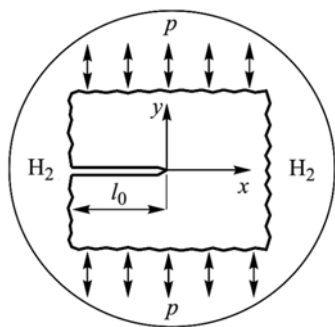


Рис. 1. Fig. 1.

Рис. 1. Схема тіла з втомною тріщиною у водні.

Fig. 1. Chart of a body with a fatigue crack in hydrogen.

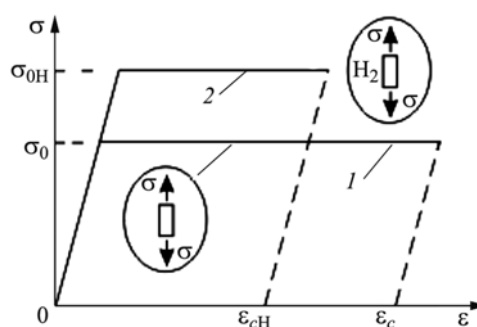


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Діаграми розтягу матеріалу на повітрі (1) та у водні (2).

Fig. 2. Stress-strain diagrams of material in air (1) and in hydrogen (2).

**Формулювання задачі.** Задано пружно-пластичне ізотропне тіло, яке послаблене плоскою макротріщиною завдовжки  $l_0$  і перебуває в умовах дії газоподібного водневого середовища та циклічного навантаження зусиллями  $p$  симетрично відносно серединної площини тріщини (рис. 1). Для матеріалу тіла встановлені базові механічні характеристики на повітрі ( $\sigma_0$  – усереднене модельне значення границі текучості;  $\varepsilon_c$  – критична деформація) та у водневому середовищі ( $\sigma_{0H}$ ,  $\varepsilon_{cH}$  – відповідні значення за певної концентрації водню) (рис. 2).

Необхідно встановити залежність швидкості росту втомної тріщини від фізико-механічних характеристик, що відтворюють умови сумісної дії силового параметра  $p$  та водневого середовища заданої концентрації.

**Розрахункова модель.** Для розв’язання поставленої задачі використаємо підхід, запропонований для побудови діаграми втомного руйнування на основі співвідношення енергетичних параметрів, характерних матеріалу за циклічного навантаження [6]. При цьому ґрунтуємось на припущеннях, які дають можливість поширити концепції попередньої розрахункової моделі на водневе середовище, зокрема, вважаємо, що водень змінює лише механічні характеристики пружно-пластичного матеріалу ( $\sigma_{0,2}$ ;  $\sigma_B$ ;  $\varepsilon_c$ ); закриття тріщини є результат контакту пластично здеформованого матеріалу на берегах тріщини під час її підростання; пружно-пластичний матеріал циклічно стабільний (енергія руйнування, коли задане циклічне навантаження за кожен цикл, стала).

Розглянемо безмежну пластину із ідеального пружно-пластичного матеріалу, яка послаблена автотріщиною і перебуває в газоподібному водні за початкової його концентрації. Пластина піддана дії циклічних навантажень, що змінюються від  $p_{\min}$  до  $p_{\max}$  упродовж одного циклу (рис. 3). Потрібно визначити швидкість поширення тріщини у вигляді аналітичної залежності від заданих умов, ураховуючи ефекти реверсивного пластичного деформування, які супроводжують втомне руйнування.

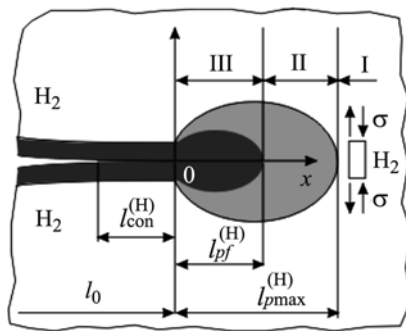


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Схематичне зображення зони передруйнування.

Fig. 3. Schematic presentation of the prefracture zone.

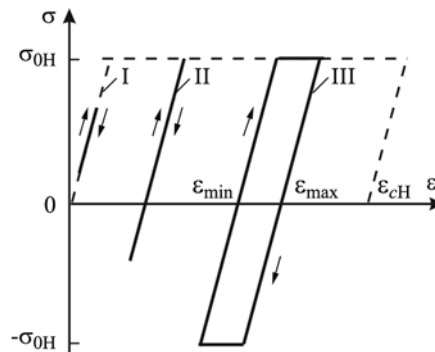


Рис. 4. Fig. 4.

Рис. 4. Утворення і розвиток петлі гістерезису.

Fig. 4. The formation and development of a hysteresis loop.

Швидкість поширення тріщини моделюємо швидкістю наближення розрахункового елемента, орієнтованого симетрично відносно площини розташування тріщини, до вершини тріщини крізь певну область передруйнування, де він губить свою цілісність. Виділимо (рис. 3) три якісно відмінні ділян-

ки напружено-деформованого стану тіла під час дії на нього зовнішнього циклічного навантаження. На ділянці I матеріал деформується пружно, ділянка II є зоною незмінних пластичних деформацій, а ділянка III – циклічно змінних (рис. 4). Очевидно, що руйнування розрахункового елемента починається лише за входження його в межі ділянки III, де ширина петлі гістерезису стає ненульова і поциклово неперервно зростає. Тобто починається дисипація енергії пластичних деформацій за один цикл та її поциклове нагромадження до певного критичного значення під час руху елемента вершини тріщини. Повністю елемент зруйнується після виходу із ділянки III. При цьому швидкість поширення втомної тріщини буде пропорційна до площі петлі гістерезису (рис. 4) та обернено пропорційна до повної енергії руйнування.

Зрозуміло, що в кожній з цих трьох умовних ділянок концентрація водню зростатиме з наближенням розрахункового елемента до вершини тріщини. Під час випробувань циліндричного зразка концентрація водню у шийці зразка також змінюється пропорційно до деформацій розтягу. Тут не розглядатимемо механізм дифузії водню в зоні передруйнування, а лише враховуватимемо опосередкований і кінцевий його вплив на механічні характеристики матеріалу.

Відомо, що наводнювання змінює механічні властивості матеріалу і, як правило, проявляється у збільшенні міцності та зменшенні пластичності [7]. З одного боку, матеріал стає міцнішим, з іншого – крихкішим (рис. 2). В результаті змінюються енергетичні його запаси, які повинні призвести до зміни характеристик опірності руйнуванню. Спрогнозувати, як саме зміна цих двох параметрів вплине на швидкість росту втомної тріщини в наводненому матеріалі складно. Але оцінити цей вплив можна шляхом аналізу співвідношення складників енергетичного балансу для розрахункового елемента, що рухається в зоні передруйнування зі швидкістю  $v_H = dl/dN$  [6]. За аналогією з ненаводненим матеріалом отримаємо вираз для швидкості росту тріщини у загальному вигляді:

$$v_H = \frac{G_{fH}^*}{G_{cH} - G_{sH}}, \quad (1)$$

де  $G_{cH}$ ,  $G_{sH}$ ,  $G_{fH}^*$  – відповідно, повна енергії руйнування, статичні і питомі циклічні складники. При цьому

$$G_{cH} = \sigma_{0H} \cdot \varepsilon_{cH}, \quad G_{sH} = \sigma_{0H} \cdot \varepsilon_{\max}; \quad (2)$$

$$G_{fH}^* = 2\sigma_{0H} \cdot \int_0^{l_{pf}^{(H)}} [\varepsilon_{\max}(x) - \varepsilon_{\min}(x)] dx; \quad (3)$$

$\varepsilon_{\min}$ ,  $\varepsilon_{\max}$  – мінімальне і максимальне значення пластичної деформації розрахункового елемента в зоні циклічних деформацій впродовж одного циклу навантаження;  $l_{pf}^{(H)}$  – розмір циклічної пластичної зони.

Рівняння (1) можна звести до розгорнутого вигляду:

$$v_H = 2l_{p_{\max}}^{(H)} \frac{\varepsilon_{\max}(0)}{\varepsilon_{cH}} \frac{\gamma(R)}{1 - \frac{\varepsilon_{\max}(0)}{\varepsilon_{cH}}}, \quad (4)$$

де  $l_{p_{\max}}^{(H)}$  – розмір статичної пластичної зони:

$$l_{p_{\max}}^{(H)} \sim \sigma_{0H}^{-2}; \quad (5)$$

$\gamma(R)$  – функція впливу асиметрії циклу навантаження ( $R = p_{\min}/p_{\max}$ );

$$\gamma(R) \approx \gamma_0 \cos^m \left( \frac{\pi}{2} R \right), \quad (6)$$

$\gamma_0, m$  – інтерполяційні параметри:

$$\gamma_0 = \gamma(0) = 4,069 \cdot 10^{-3}, \quad m = 4,128. \quad (7)$$

З формули (4) видно, що швидкість росту втомної тріщини обернено пропорційна параметрам  $\sigma_{0H}$  і  $\varepsilon_{cH}$ . Але оскільки водень по-різному впливає на їх зміну, то параметр  $\sigma_{0H}$  зменшує швидкість, а  $\varepsilon_{cH}$ , навпаки, підвищує. Для апробації формули на конкретних матеріалах її необхідно записати в координатах, звичних для експериментальної побудови кінетичних діаграм втомного руйнування, тобто швидкості  $\frac{dl}{dN}$  і КІН  $K_{\max}$ . З використанням відомого для автомодельної тріщини зв'язку між деформаційними та силовим параметром  $K_{\max}$  формула (4) набуде вигляду

$$v_H = \frac{\pi}{4} \gamma_0 \cos^m \left( \frac{\pi}{2} R \right) \left( \frac{K_{cH}}{\sigma_{0H}} \right)^2 \frac{\left( \frac{K_{\max}}{K_{cH}} \right)^4}{1 - \left( \frac{K_{\max}}{K_{cH}} \right)^2}, \quad (8)$$

де  $K_{cH}$  – критичне значення  $K_{\max}$  за наявності водню.

За рівнянням (8) можна оцінити кількісний вплив водню із заданою початковою концентрацією на трансформацію діаграми втомного руйнування ненаводненого матеріалу ( $v_0 \sim K_{\max}$ ). Іншими словами, швидкості поширення тріщини у наводненому і ненаводненому середовищах за однаковості решти умов пов'язані між собою співвідношенням

$$v_H = f(\alpha, \beta, K_{\max}/K_c) \cdot v_0, \quad (9)$$

де  $\alpha = \sigma_{0H}/\sigma_0$ ;  $\beta = K_{cH}/K_c$ ,

$$f(\alpha, \beta, K_{\max}/K_c) = \alpha^{-2} \cdot \frac{1 - (K_{\max}/K_c)^2}{\beta^2 - (K_{\max}/K_c)^2}. \quad (10)$$

Отже, існує точка перетину двох діаграм руйнування за умови  $K_{\max}/K_c = \sqrt{(1 - (\alpha \cdot \beta)^2)/(1 - \alpha^2)}$ , яка розмежовує дві області протилежного впливу водню на швидкість росту втомної тріщини: зліва від неї швидкість зменшується, справа – зростає порівняно зі швидкістю тріщини у ненаводненому матеріалі.

**Методика досліджень.** Випробовували зразки зі сталей 08кп та 10X15H27T3B2MP за силовими схемами одновісного циклічного розтягування пластини з центральною тріщиною та триточкового згину балкового зразка.

Кінетичну діаграму втомного руйнування (КДВР) для сталі 08кп, наводненої у камері [8] впродовж 2 h при 200°C під тиском 0,2 МПа, будували на машині EU-20 за сталих частоти і асиметрії знакопостійного циклу ( $f=10$  Нс,  $R = 0,3$ ) [9]. При цьому реєстрували максимальне і мінімальне зусилля та вимірювали довжину тріщини через кожні 4 000...5 000 cycles. За допомогою відеокамери реєстрували поле переміщень біля вершини тріщини на ділянці розміром 3×4 mm на поверхні зразка за максимального і мінімального циклів навантаження. Далі встановлювали область пластичного деформування матеріалу біля вершини тріщини впродовж періоду навантаження.

Параметри циклічної тріщиностійкості для аустенітно дисперснотвердкої сталі 10X15H27T3B2MP визначали на повітрі та у водні під тиском 10 МПа при 293 К на балковому зразку розмірами  $L \times b \times t = 160 \times 40 \times 20$  mm ( $L$  – відстань між опорами;  $b$  – висота зразка;  $t$  – його товщина), за частоти навантаження 20 Hz і коефіцієнта асиметрії циклу  $R = 0,2$  [9].

**Апробація та аналіз результатів.** За результатами випробувань побудовано КДВР сталі 08кп на повітрі та у водні. Дані, отримані на повітрі, задовільно корелюють із відомими [9] на I та II ділянках КДВР у діапазоні швидкостей  $5 \cdot 10^{-9} \dots 9 \cdot 10^{-7}$  m/cycle за невисоких та середніх рівнів розмаху КІН ( $\Delta K = 10 \dots 30$  МПа  $\sqrt{\text{м}}$ ). Кінетика поширення тріщини у водні має свої особливості. Зокрема, за розмаху КІН менше  $\Delta K = 10 \dots 12$  МПа  $\sqrt{\text{м}}$  вона знижується порівняно з повітрям. При цьому криві КДВР перетинаються в області  $\Delta K = 12$  МПа  $\sqrt{\text{м}}$  і  $v = 2 \cdot 10^{-8}$  m/cycle. За вищих значень  $\Delta K$  водень спричиняє зростання швидкості росту тріщини порівняно з повітрям у всьому діапазоні  $\Delta K$  аж до критичного значення КІН, яке знижується на 20%.

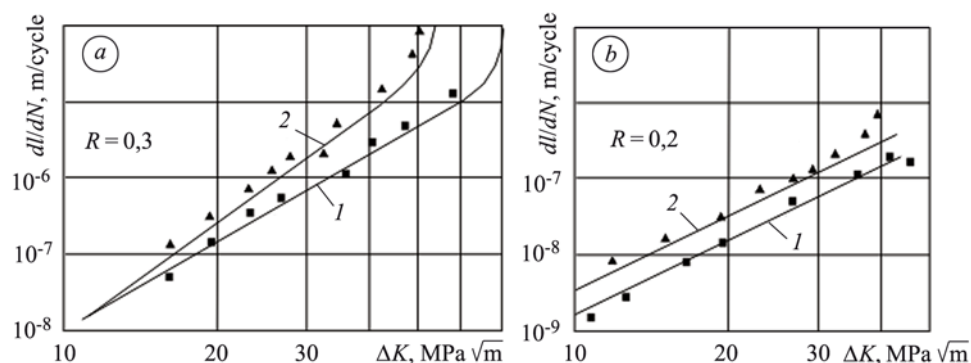


Рис. 5. Порівняння розрахункових (лінії) (а) та експериментальних (точки) (б) даних для сталей 08кп при  $R = 0,3$  та 10X15H27T3B2MP при  $R = 0,2$ : 1 – на повітрі; 2 – у водні.

Fig. 5. Comparison of calculation (lines) (a) and experimental data (points) (b) for 08kp steels at  $R = 0.3$  and 10X15H27T3B2MP steels at  $R = 0.2$ : 1 – in air; 2 – in hydrogen.

Оскільки до значного зниження характеристик пластичності та статичної тріщиностійкості дисперснотвердких нержавних сталей призводить заздалегідь введений у структуру водень [10], то для оцінки впливу розчиненого внаслідок тривалої експлуатації водню на механічні властивості сталі 10X15H27T3B2MP частину зразків попередньо витримували впродовж 10 h у газоподібному водні при  $T = 673$  K,  $P = 10$  МПа, що забезпечило об'ємне насичення зразків до концентрації  $C = 8$  ppm ( $8 \cdot 10^{-4}$  mass.%).

Значення КІН  $K_C$  для сталі 10X15H27T3B2MP за статичного навантаження прямокутного компактного зразка розмірами  $50 \times 60 \times 20$  mm при 293 К у водні за тиску 10 МПа становить  $52$  МПа  $\sqrt{\text{м}}$ , а на повітрі  $98$  МПа  $\sqrt{\text{м}}$ . Порогова циклічна тріщиностійкість при 293 К знижується від  $6,8$  МПа  $\sqrt{\text{м}}$  для ненаводнених зразків на повітрі до  $4,9$  МПа  $\sqrt{\text{м}}$  для наводнених і випробуваних у водні під тиском 10 МПа. Механічні характеристики сталі за цих параметрів і дії водню не змінюються:  $\sigma_{0,2} = 870$  МПа, а  $\sigma_B = 1270$  МПа. На рис. 5 результати розрахунків за формулою (8) зіставлено з експериментальними даними, які відтворюють специфіку впливу водню на різні матеріали.

## ВИСНОВКИ

На основі енергетичного критерію розроблено реверсивно-деформаційну модель втомного поширення тріщини в пружно-пластичному тілі за одновісного навантаження у водні. Побудовано аналітичну залежність між швидкістю поширення втомної тріщини та параметрами, що відображають властивості матеріалу, режим навантаження та кількісний внесок кожного з двох протилежних напрямів впливу на механічні характеристики матеріалу. Підтверджено неоднозначний вплив водню на зміну швидкості росту втомної тріщини та запропоновано метод його оцінки на поведінку втомної тріщини за експериментальними залежностями характеристик міцності та пластичності матеріалу від початкових значень концентрації водню.

*РЕЗЮМЕ.* Предложена теоретико-экспериментальная модель роста усталостной трещины в водородсодержащей среде. В основе модели – закономерности исчерпания энергетических запасов материала при циклическом разрушении и влияния водородсодержащей среды на механические характеристики материала. С помощью деформационного подхода механики разрушения для определения условий упруго-пластического деформирования материала около вершины трещины получены аналитические зависимости. При этом учтены эффекты закрытия трещины и асимметрия цикла нагрузки. Оценено взаимодействие разных явлений, вызванных водородом, и их совместное влияние на изменение скорости роста усталостной трещины. Расчетные значения скорости роста усталостной трещины сравнены с экспериментальными – в разных условиях для двух типов сталей.

*SUMMARY.* The theoretical-experimental calculation model of fatigue crack growth in hydrogen-containing environment is proposed. The regularities the exhausting of power supply of material under cyclic loading and the influence of hydrogen environment on mechanical characteristics of this material under static fracture form the basis of the model. The analytical dependences for determination of the conditions of elastic-plastic deformation of the material at the crack tip are given within the framework of the deformation approach of fracture mechanics. The effect of crack closure and load ratio of a cycle are thus taken into account. Interaction of various tendencies caused by the presence of hydrogen and their common influence on the change of fatigue crack growth rate is evaluated. Calculation values of fatigue crack growth rates are compared with the experimental data in different environments for two types of steels.

1. Панасюк В. В., Андрейків А. Е., Харин В. С. Теоретический анализ роста трещин в металлах при воздействии водорода // Физ.-хим. механика материалов. – 1981. – № 4. – С. 61–75.
2. Панасюк В. В., Андрейків А. Е., Обухівський О. І. Расчетная модель роста трещины в металлах при воздействии водорода // Там же. – 1984. – № 3. – С. 3–6.
3. Андрейків А. Е., Голян О. М. Докритический рост усталостных трещин в металлах при воздействии водорода // Там же. – 1985. – № 4. – С. 5–8.
4. Андрійків О. С., Рудавський Д. В. Розрахунок ресурсу елемента трубопроводу під впливом водневого середовища // Там же. – 1999. – № 4. – С. 43–48.
5. Ткачов В. І. Механізм оборотного впливу водню на механічні властивості сталі // Там же. – 1999. – № 4. – С. 29–37.
6. Кунь П. Реверсивно-деформаційна модель втомного поширення тріщин в пружно-пластичних тілах // машинознавство. – 2001. – № 4–5. – С. 42–45.
7. Андрейків А. Е., Дарчук А. І. Усталостное разрушение и долговечность конструкций. – К.: Наук. думка, 1992. – 184 с.
8. Штаюра С. Т., Мольков Ю. В., Вергун І. А. Оцінка водневої деградації конструкційних матеріалів за двовісного навантаження // машинознавство. – 2008. – № 2. – С. 37–41.
9. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пос. в 4-х т. / О. Н. Романив, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин и др. // Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов. – К.: Наук. думка, 1990. – Т. 4. – 680 с.
10. Андрейків О. С., Никифорчин Г. М., Ткачов В. І. Міцність і руйнування металічних матеріалів і елементів конструкцій у водневомісних середовищах // Фізико-механічний інститут: Поступ і здобутки. – Львів, 2001. – С. 248–286.

Одержано 27.11.2009