УДК 620.197.5: 669.788

ПРОГНОЗУВАННЯ КІНЕТИКИ РОСТУ ТРІЩИНИ ТА ЗАЛИШКОВОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ ПОСУДИН У ГАЗОПОДІБНОМУ ВОДНІ

О. В. ГЕМБАРА, Л. М. ІВАСЬКЕВИЧ, В. М. МОЧУЛЬСЬКИЙ, О. Я. ЧЕПІЛЬ

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

Запропоновано теоретико-експериментальний підхід для прогнозування кінетики росту тріщини та визначення залишкової довговічності посудин у газоподібному водні. Побудовано кінетичні діаграми водневого розтріскування (КДВР) литої мартенситної сталі ВНЛ-1М (05Х13Н8М3) за різного тиску зовнішньої водневої атмосфери та концентрації заздалегідь поглиненого за високих температур водню, встановлено порогові значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН), розраховано залишкову довговічність трубопроводу та газового балона високого тиску. Встановлено, що на першій ділянці КДВР з ростом тиску і концентрації водню зменшується порогове значення КІН, а на другій – зростає швидкість докритичного росту тріщини.

Ключові слова: *короткочасна та довготривала статична тріщиностійкість, водневе розтріскування, мартенситна сталь, прогнозування довговічності.*

Для обладнання енергетичного машинобудування, працюючого за високих напружень, температур і тисків водневовмісних середовищ, необхідні матеріали, які поєднують високу міцність та тріщиностійкість, а також надійні методи оцінювання їх роботоздатності. Етапи водневого окрихчення такі: утворення мікротріщин, їх ріст до критичних розмірів та передчасний катастрофічний вихід з ладу елементів конструкцій. Закономірності такого процесу досліджують з використанням методів механіки руйнування, зокрема, сповільнене руйнування у водні описують кінетичними діаграмами водневого розтріскування (КДВР) – залежностями швидкості росту тріщини v від коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) $K_{\rm I}$, який відображає геометрію тіла та прикладене навантаження [1, 2]. Через довготривалість, затратність і вибухонебезпечність експериментальної побудови діаграм за різних тисків та концентрацій водню доцільно використовувати теоретичні моделі кінетики росту тріщини, які дають змогу отримати значення функції $v(K_{\rm I}, C)$ за обмежених дослідних результатів [1, 2]. Нижче наведені експериментальні та обчислені КДВР сталі ВНЛ-1М (05Х13Н8М3) та розрахунок залишкового ресурсу трубопроводу і газового балона у водні високого тиску.

Алгоритм розрахунку елементів конструкцій на довговічність у газоподібному водні. Нехай a_i – характерний лінійний розмір початкового дефекту, встановлений засобами дефектоскопії, і визначений КІН для елемента конструкції. Тоді на основі даних про тріщиностійкість матеріалу визначають граничні розміри тріщини, а саме [2]: граничний розмір a_0 тріщини, що не росте за заданого навантаження, тобто виконується умова: $K_{\rm I}(a_0) = K_{{\rm I}th}^{(\rm H)}$; критичний розмір тріщини $a_{\rm cr}$, з якого починається катастрофічний її розвиток, тобто виконується умова: $K_{\rm I}(a_{\rm cr}) = K_{{\rm I}c}$.

Тріщина, розмір якої a_i знаходиться в інтервалі $a_0 < a_i < a_{\rm cr}$, за заданих умов експлуатації може збільшуватися. Ріст такої тріщини визначає довговічність конструкції, яку оцінюють з розв'язку рівняння

Контактна особа: О. В. ГЕМБАРА, e-mail: hembara@ipm.lviv.ua

$$da/dt = v(K_{\mathrm{I}},\ C)\,, \tag{1}$$

де v – швидкість росту тріщини; K_{I} – КІН; C – концентрація водню.

Аналітично КДВР можна описати співвідношенням [1]

$$v \approx \frac{2D\sigma_{0,2}E\exp(-2\alpha m)\left[B(C_S - C_0)\exp(2\alpha m) - 1 + K_{\mathrm{I}}^2/K_{\mathrm{I}c}^2\right]^2}{\pi\alpha K_{\mathrm{I}}^2\left(1 - K_{\mathrm{I}}^2/K_{\mathrm{I}c}^2\right)^2}\,, \tag{2}$$

де $m = 1{,}8V_{\mathrm{H}}\sigma_{0,2}/(2RT)$; D – коефіцієнт дифузії водню; C_0 і $C_S = K_S\sqrt{P}$ – відповідно концентрація заздалегідь поглинутого і зовнішнього водню; K_S – коефіцієнт розчинності водню; R – газова стала; T – температура; V_{H} – парціальний молярний об'єм водню у металі; P – тиск водню; α і B – характеристики системи метал–водневе середовище.

Для практичного використання співвідношень (1), (2) необхідно отримати значення K_{Ic}, B, α, $\sigma_{0,2}$ для розглядуваної системи метал–водень. Їх знаходять з експериментів.

Матеріали та методика випробувань. Досліджували литу мартенситну сталь ВНЛ-1М (05Х13Н8М3), яку використовують для виготовлення водневих помп та трубопроводів [3]. Хімічний склад, режими термічних обробок і характеристики міцності та пластичності сталі у повітрі та водні за кімнатної температури і швидкості розтягу 0,1 mm/min, наведені у таблиці. Розвинута дендритна ліквація легувальних елементів і домішок зумовила виділення значної кількості неметалічних включень: карбідосульфідів, карбідів та фосфатів і оторочки інтерметалідних фаз (рис. 1). Структура мартенситно-аустенітна із 10…25% залишкового аустеніту, рівномірно розподіленого на межах мартенситу у вигляді прошарків шириною 1...6 μm, карбідами Me_2C і $Me_{23}Cr_6$ та невеликою кількістю інтерметалідів Fe_2Mo, розташованих на межах і всередині зерна.

Мартенсит, в основному, пакетний (85…90%) із розмірами пакетів 30...100× ×90...250 μm, шириною рейок 2...5 μm. Характерна особливість сталей із 12… 14 mass.% Cr – спроможність гартуватися за невеликого вмісту вуглецю, що обумовлено високою стабільністю хромистого аустеніту, яка призводить до суттєвого зменшення критичних швидкостей формування мартенситної структури за охолодження у повітрі [4].

Хімічний склад, режими термічної обробки сталі та механічні властивості ненаводнених зразків у повітрі (чисельник), та заздалегідь наводнених (C_{H} = 7,6 wppm) у водні за тиску 10 MPa при 293 K

Хімічний склад ВНЛ-1М, mass.%	Термічна обробка	Механічні властивості					
		σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$K_{\mathrm{I}c}$ (J_c)	K_c
		MPa		%		MPa$\sqrt{\mathrm{m}}$	
0,045 C; 0,38 Si; 12,9 Cr; 7,8 Ni; 2,69 Mo; 0,43 Mn; 0,057 La	Гартування 1403 K, 3 h, повітря; двократна обробка холодом при 220 K, 5 h; відпуск 773 K, 3 h	1280 1180	1110 1050	20 9	63 21	98 –	135 58

Частину зразків витримували впродовж 2…4 h при 773 K у водні під тиском 5, 10 і 15 MPa, і після витримок його вміст C_{H}, визначений хроматографічним методом на приладі Leko TCH 600, становив 3,3; 4,9 і 7,6 wppm, відповідно. За випробувань у водні робочу камеру вакуумували, продували воднем, повторно

вакуумували та заповнювали воднем до тиску 10 MPa. Всі механічні характеристики визначали за кімнатної температури. На короткочасний розтяг у повітрі та водні випробовували стандартні п'ятикратні циліндричні зразки із діаметром робочої частини 5 mm. Коефіцієнти статичної тріщиностійкості K_c та K_{Ic} (J_c) визначали згідно зі стандартами [5, 6] за триточкового згину балкових зразків розмірами 10×20×100 mm та втомною тріщиною завдовжки 9…11 mm. Швидкість навантаження за статичних випробовувань 0,1 mm/min.

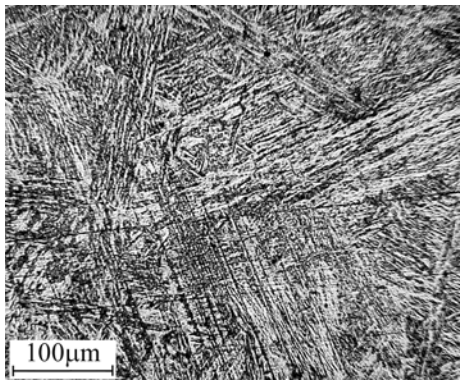

Рис. 1. Мікроструктура сталі ВНЛ-1М.

Fig. 1. Microstructure of ВНЛ-1М steel.

Докритичний ріст тріщини у водні досліджували за силовою схемою навантаження двоконсольного балкового (ДКБ) зразка розміром 10×20×150 mm зі сталим розкриттям та боковими V-подібними надрізами із кутом 60° і глибиною 1,5 mm, які фіксують тріщину в площині, перпендикулярній до прикладених напружень, та забезпечують утворення плоскої деформації, необхідної для отримання коректних значень K_I. Ненаводнені та заздалегідь наводнені зразки навантажували у повітрі сталевим гвинтом за допомогою тарувального ключа зі швидкістю ~0,03 s^{-1} до значення КІН K_I дещо меншого за значення K_{Ic}. Частину навантажених зразків залишали у повітрі, а решту поміщали у камеру з воднем. Останні періодично виймали та фіксували підростання тріщини з обох сторін за допомогою інструментального мікроскопа з поділкою 0,01 mm. Довжина зразка була достатня для повної зупинки тріщини і отримання порогових значень КІН $K_{Ith}^{(H)}$. Така схема навантаження дала можливість одержати повну залежність K_I від довжини тріщини на одному зразку. База випроб 300 h.

Вплив водню на механічні властивості та статичну тріщиностійкість. У повітрі міцність, пластичність та в'язкість руйнування високі (див. таблицю), що характерно для старіючих мартенситних сталей із дрібнодисперсною структурою (рис. 1) [4, 7]. Отримані на зразках завтовшки 10 mm значення K_c = 135 MPa$\sqrt{\text{m}}$ не задовольняють умову автомодельності [5]. Тому необхідний для побудови КДВР критичний КІН K_{Ic}, який відповідав би умовам плоскої деформації, визначали методом J-інтеграла [8], а також обчислювали за формулою Ірвіна [9]: $K_c = K_{Ic} \times$ $\times(1+1,4\beta_{Ic}^2)^{1/2}$, де $\beta_{Ic} = (1/t)(K_{Ic}/\sigma_{0,2})^2$, t – товщина зразка, $\sigma_{0,2}$ – границя текучості. Експериментальні та розрахункові значення K_{Ic} у повітрі рівні відповідно 98 та 96 MPa$\sqrt{\text{m}}$, причому в обох випадках вони задовольняють умови плоскої деформації для використаних зразків [5, 9]. Так, β_{Ic} = 0,80 ≤ 1, $\beta_c = (1/t) \times$ $\times(K_c/\sigma_{0,2})^2 = 1,66 < \pi$, отже, згідно з працею [9], формула Ірвіна дає змогу отримати параметр K_{Ic} для сталі.

Раніше встановлено [10], що за короткочасного розтягу у повітрі зі зростанням вмісту заздалегідь поглинутого водню від 3,3 до 7,6 wppm суттєво погіршуються відносне видовження δ, поперечне звуження ψ та коефіцієнт тріщиностійкості K_c за майже незмінних характеристик міцності σ_B і $\sigma_{0,2}$. Газоподібний водень під тиском 10 MPa додатково підсилює окрихчення і внаслідок спільної дії внутрішнього і зовнішнього водню характеристики пластичності та в'язкість руйнування знижуються у 2–3 рази. Наведені (див. таблицю) та раніше встанов-

лені [10] результати свідчать, що вплив водню на тріщиностійкість сталі ВНЛ-1М зростає зі збільшенням його тиску та концентрації, загострення вершини тріщини, а також зі зменшенням швидкості навантаження, що узгоджується із відомими моделями, побудованими на взаємодії абсорбованого водню із полем напружень попереду тріщини [11].

Експериментальна та розрахункова побудова кінетичних діаграм. У повітрі розтріскування навантажених до значення КІН ~ 0,8…0,9 K_{Ic} (108…120 MPa$\sqrt{\text{m}}$) вихідних та наводнених (C_{H} = 7,6 wppm) зразків не відбувається. Відомо, що швидкісний чинник суттєво впливає на параметр K_c сталі за наявності водню [10]. Очевидно, швидкість попереднього навантаження у повітрі за вказаного вмісту водню надто висока для проростання тріщини, імовірно, через формування перед нею пластичної зони. Додаткова дія водню за тисків P = 5…15 MPa ініціює водневе розтріскування заздалегідь наводнених ДКБ зразків, причому на першій ділянці КДВР зі збільшенням P і C зменшується порогове значення КІН $K_{\text{I}th}^{(\text{H})}$, а на другій – зростає швидкість докритичного росту тріщини v (рис. 2).

Співвідношення (1) добре описує залежність v від K_{I}, отриману експериментальним шляхом за різних тисків та концентрацій заздалегідь поглинутого водню (рис. 2). Величини α і B обчислені (рис. 3) методом найменших квадратів за експериментальними точками і розрахунковими кривими 1–3 (рис. 2):

$$B(P) = 0,323 - 0,01391P, \quad \alpha = 0,0998. \tag{3}$$

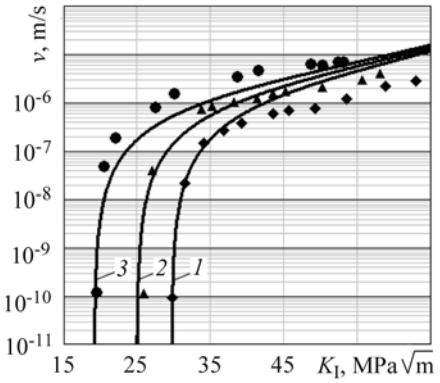

Рис. 2. Fig. 2.

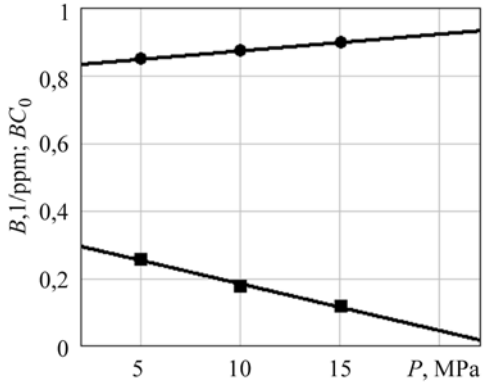

Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 2. Експериментальні (◆, ▲, ●) та аналітичні (суцільні лінії) КДВР зразків після попереднього наводнення за режимами: *1* – 773 K, 5 MPa, 4 h (C = 3,3 wppm); *2* – 773 K, 10 MPa, 2 h (4,9 wppm); *3* – 773 K, 15 MPa, 2 h (7,6 wppm).

Fig. 2. Experimental (◆, ▲, ●) and analytical (solid lines) kinetic diagrams of hydrogen crcaking of samples after previous hydrogenatin for conditions: *1* – 773 K, 5 MPa, 4 h (C = 3.3 wppm); *2* – 773 K, 10 MPa, 2 h (4.9 wppm); *3* – 773 K, 15 MPa, 2 h (7.6 wppm).

Рис. 3. Залежності коефіцієнтів BC_0 (●) і B (■) від тиску водню P.

Fig. 3. Dependences of BC_0 (●) and B (■) coefficients on hydrogen pressure, P.

Якщо концентрація C_0 заздалегідь поглинутого водню невідома, то визначаємо добуток константи B на концентрацію C_0 (рис. 3), який входить у співвідношення (2):

$$BC_0(P) = 0,82325 + 0,005P. \tag{4}$$

У результаті рівняння швидкості росту тріщини одержані у такому вигляді

$$v(\lambda) = 1,332 \cdot 10^{-5} \lambda^{-1} (\lambda - 0,09165)^2 (1-\lambda)^{-2} \quad \text{за тиску} \quad P = 5 \text{ MPa}; \tag{5}$$

$$v(\lambda) = 1{,}332 \cdot 10^{-5} \lambda^{-1} \left(\lambda - 0{,}0648\right)^2 \left(1 - \lambda\right)^{-2} \quad \text{за тиску} \quad P = 10 \text{ MPa}; \qquad (6)$$

$$v(\lambda) = 1{,}332 \cdot 10^{-5} \lambda^{-1} \left(\lambda - 0{,}038\right)^2 \left(1 - \lambda\right)^{-2} \quad \text{за тиску} \quad P = 15 \text{ MPa}, \qquad (7)$$

де $\lambda = K_{\mathrm{I}}^2 / K_{\mathrm{I}c}^2$.

Розрахунок залишкової довговічності трубопроводу. Використовуючи одержані результати, розраховуємо ресурс залишкової міцності товстостінної труби, виготовленої зі сталі ВНЛ-1М, працюючої під тиском водню (P = 5 MPa) за кімнатної температури (рис. 4). На внутрішній поверхні цієї труби знайдений дефект у вигляді напівеліптичної тріщини. Необхідно визначити допустимий розмір тріщини, за якого труба працюватиме заданий час.

Кільцеве напруження, яке діє в стінках труби, обчислили за формулою [1]

$$\sigma = P \frac{2R_0^2}{R_0^2 - R_{\mathrm{I}}^2}, \qquad (8)$$

де P – тиск водню в трубі; R_0 = 40 mm і R_1 = 18 mm – зовнішній і внутрішній радіуси труби, відповідно.

Під дією цього напруження і середовища тріщина розповсюджується по товщині стінки і виходить на зовнішню поверхню. Коефіцієнт інтенсивності напружень $K_{\mathrm{I}}^{(A)}$ в точці найбільшої глибини (при $\alpha = \pi/2$; $\beta = ab^{-1} = 0{,}7$) рівний:

$$K_{\mathrm{I}}^{(A)} = 1{,}33\sqrt{a}\,\sigma \exp(-0{,}49\eta^2),$$

$$\eta = a(R_0 - R_1)^{-1}. \qquad (9)$$

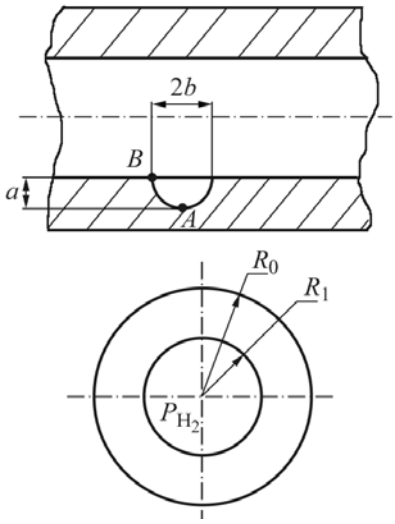

Рис. 4. Схема товстостінного трубопроводу.

Fig. 4. Scheme of a thick-walled pipe.

Визначимо безпечний a_0 і критичний a_{cr} розміри тріщини. Для цього підставляємо у вираз (9) значення порогове $K_{\mathrm{I}th}^{(\mathrm{H})}$ і критичне $K_{\mathrm{I}c}$ – 25,9 і 98 MPa$\sqrt{\mathrm{m}}$, відповідно. В результаті цього отримаємо безпечний a_0 = 2 mm і критичний a_{cr} = 15 mm розміри тріщини.

Далі підставляємо вираз (9) у рівняння (5), що описує кінетику росту тріщини в сталі ВНЛ-1М заздалегідь наводненої під тиском P = 5 MPa, і проінтегрувавши його, побудуємо залежність довговічності роботи трубопроводу від величини дефекту (рис. 5, крива *1*). Процедуру повторюємо для інших значень тиску (рис. 5, криві *2*, *3*).

Розрахунок залишкової довговічності газових балонів високого тиску. Запропонована методика використовувалася також для оцінки залишкового ресурсу газових балонів високого тиску, досліджених у праці [9]. Вивчали декілька газових балонів з номінальною товщиною стінки T = 7,6 mm і діаметром 229 mm, виготовлених зі сталі ВНЛ-1М. На їх зовнішній поверхні за допомогою електроіскрової установки навели гострі півеліптичні дефекти довжиною від 25 до 76 mm різної глибини. Балони монотонно навантажували тиском води до руйнування. Встановили, що початкова глибина півеліптичного поверхневого дефекту a ~ 2,54…2,77 mm; довжина l ~ 25,4…30,5 mm. Кінцеві розміри дефекту такі: a ~ 5,99…7,16 mm; l ~ 30,5… 35,6 mm, а тріщиностійкість 99,7 MPa$\sqrt{\mathrm{m}}$. Кільцеве напруження, за якого тріщина почала рости, 510…537 MPa.

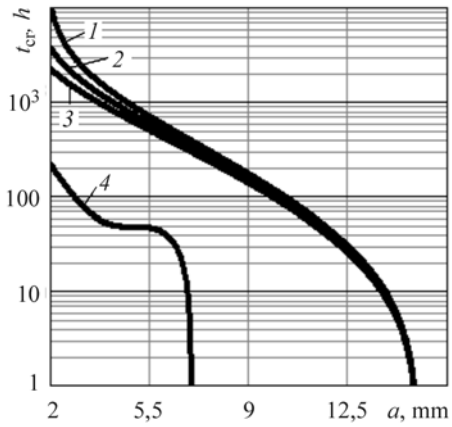

Рис. 5. Залежності довговічності труби за різних тисків заздалегідь поглинутого водню (*1* – P = 5 MPa; *2* – 10 MPa; *3* – 15 MPa) та газового балона (*4* – P = 16 MPa) від глибини тріщини.

Fig. 5. Dependences of tubes durability at different pressures of the previously absorbed hydrogen (*1* – P = 5 MPa; *2* – 10 MPa; *3* – 15 MPa) and the gas cylinder (*4* – P = 16 MPa) on the crack depth .

КІН для поверхневої тріщини визначають так:

$$K_{\mathrm{I}} = M\sigma\sqrt{\pi a / Q}\,, \qquad (10)$$

де σ – прикладене напруження; a – глибина тріщини; $Q = 1 + 1{,}464(a/c)^{1{,}65}$ – коефіцієнт форми тріщини; $l = 2c$ – довжина тріщини (30,5 mm); $2c$ – велика вісь півеліптичної тріщини; M – поправний коефіцієнт на мембранне напруження (1,44), який визначали зі співвідношення

$$M = [M_1 + M_2(a/T)^2 + M_3(a/T)^4]\, g f_\theta;$$

$$M_1 = 1{,}13 - 0{,}09(a/c), \quad M_2 = -0{,}54 + 0{,}89/(0{,}2 + a/c);$$

$$M_3 = 0{,}5 - 1/(0{,}65 + a/c) + 14(1 - a/c) + 14(1 - a/c)^{24};$$

$$g = 1 + [0{,}1 + 0{,}35(a/T)^2](1 - \sin\theta)^2;$$

$$f_\theta = [(a/c)^2\cos^2\theta + \sin^2\theta]^{1/4};$$

$\theta = \pi/2$ (для інтенсивності напружень у найглибшій точці тріщини). (11)

Далі, підставляючи вирази (10), (11) у рівняння (2), що описує кінетику росту тріщини в сталі ВНЛ-1М у водні, і проінтегрувавши його, побудували залежність довговічності роботи газового балона від величини дефекту (рис. 5, крива *4*). Коефіцієнти α і B обчислювали за співвідношенням (3) за тиску P = 16 MPa.

Аналізуючи отримані результати (рис. 5), бачимо, що зі збільшенням тиску, а відповідно і концентрації заздалегідь поглиненого за високих температур водню, у 2–3 рази понижується довговічність елементів конструкцій за тріщин глибиною в межах 2…6 mm. За глибших тріщин цей вплив не такий суттєвий.

ВИСНОВКИ

Побудовано КДВР литої мартенситної сталі ВНЛ-1М (05Х13Н8М3) за різного тиску зовнішньої водневої атмосфери та концентрації заздалегідь поглиненого за високих температур водню, встановлено порогові значення КІН, розраховано залишкову довговічність трубопроводу та газового балона високого тиску. Порівняння аналітичної КДВР з експериментальними результатами підтвердило коректність кінетичного співвідношення для прогнозування залишкової довговічності наводнених елементів конструкцій. Маючи значення α і B, можна описати кінетику росту тріщини за будь-якого тиску та вмісту водню. Причому коефіцієнт α майже не змінюється зі зростанням тиску, а зміну B добре описує лінійне співвідношення (3). Незалежність α від тиску водню знаходить своє фізичне пояснення. Згідно з модельним поданням, α визначає місце локального розтріскування і жорстко пов'язана з розкриттям тріщини та залежить від структурного стану досліджуваного матеріалу.

Вплив водню на параметр короткочасної статичної тріщиностійкості K_c сталі ВНЛ-1М підсилюється зі збільшенням його тиску та концентрації, загострення вершини тріщини, а також зі зменшенням швидкості навантаження. На першій ділянці КДВР з ростом P і C знижується порогове значення коефіцієнта інтенсивності напружень $K_{\mathrm{I}th}^{(\mathrm{H})}$, а на другій – зростає швидкість докритичного росту тріщини v.

РЕЗЮМЕ. Предложен теоретико-экспериментальный подход для прогнозирования кинетики роста трещины и определения остаточной долговечности сосудов в газообразном водороде. Построены кинетические диаграммы водородного растрескивания (КДВР) литой мартенситной стали ВНЛ-1М (05Х13Н8М3) при разном давлении внешней водородной атмосферы и концентрации предварительно поглощенного при высоких температурах водорода, установлены пороговые значения коэффициента интенсивности напряжений (КИН), расчитана остаточная долговечность трубопровода и газового баллона высокого давления. Установлено, что на первом участке КДВР с ростом давления и концентрации водорода уменьшается пороговое значение КИН, а на втором – растет скорость докритического роста трещины.

SUMMARY. A theoretical and experimental approach for predicting the kinetics of crack growth and determining the residual life of vessels in gaseous hydrogen was developed. Kinetic diagrams of hydrogen cracking (KDHC) of the cast ВНЛ-1М (05Х13Н8М3) martensitic steel under different external pressure of hydrogen atmosphere and the concentration of pre-adsorbed hydrogen at high temperatures were constructed, the thresholds stress intensity factors were established, the residual life of a high pressure tank and a gas cylinder was calculated. It was found that in the first section of KDHC with the hydrogen pressure and concentration increase the threshold stress intensity factor decreases, and in the second – the speed of subcritical crack growth increases.

1. *Андрейків О. Є, Гембара О. В.* Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах. – К.: Наук. думка, 2008. – 343 с.
2. *Панасюк В. В.* Механика квазихрупкого разрушения материалов. – К.: Наук. думка, 1991. – 416 с.
3. *Фішгойт А. В., Колачев Б. А.* Випробування на міцність у водні в аерокосмічній промисловості // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1997. – **33**, № 4. – С. 151–154.
(*Fishgoit A. V. and Kolachev B. A.* Strength tests in hydrogen in the aerospace industry // Materials Science. – 1997. – **33**, № 4. – P. 568–573.)
4. *Абрамович М. Д., Вотинов С. Н., Иолтуховский А. Г.* Радиационное материаловедение на АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 136 с.
5. *ГОСТ 25506-85*. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 61 с.
6. *Standard* Test Method for JIC. A Measure of Fracture Toughness ASTM STP E 813. – 1989. – P. 732–746.
7. *Балицький О. І., Іваськевич Л. М., Мочульський В. М.* Механічні властивості мартенситних сталей у газоподібному водні // Проблеми міцності. – 2012. – № 1. – С. 89–99.
8. *Іваськевич Л. М., Балицький О. І., Мочульський В. М.* Вплив водню на статичну тріщиностійкість жароміцних сталей // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – **48**, № 3. – С. 78–86.
9. *Рана М. Д.* Экспериментальная проверка требований к трещиностойкости, обеспечивающих возникновение утечки перед разрушением в газовых цилиндрах из стали с пределом прочности 1068...1206 МПа // Теоретические основы инженерных расчетов. Тр. амер. об-ва инж.-механиков. – 1988. – № 3. – С. 172–180.
10. *Іваськевич Л., Мочульський В., Ленковський Т.* Вплив водню на статичну тріщиностійкість литої сталі // Пр. Десятого міжнар. симп. інж.-механіків у Львові (25–27 травня 2011 р.). – Львів: ТЗОВ Кінпатрі ЛТД, 2011. – С. 98–99.
11. *Панасюк В. В., Андрейкив А. Е., Обухивский О. И.* Расчетная модель роста трещины в металлах при воздействии водорода // Физ.-хим. механика материалов. – 1984. – № 3. – С. 3–6.

Одержано 09.07.2012