

УДК:539.375;539.4:536.543

## РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ ПОШИРЕННЯ ТРІЩИН У БІМЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛАХ ЗА ВИСОКИХ КОНЦЕНТРАЦІЙ ТА ТЕМПЕРАТУР ВОДНЮ

О. С. АНДРЕЙКІВ<sup>1</sup>, Л. Н. ДОБРОВОЛЬСЬКА<sup>2</sup>, Н. В. ЯВОРСЬКА<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Львівський національний університет ім. Івана Франка;

<sup>2</sup> Луцький національний технічний університет

Запропонована розрахункова модель для визначення кінетики поширення в тілі водневих тріщин, що спричинено високими тисками в них через надвисокі концентрації водню в тілі. В основі моделі – деформаційний критерій механіки руйнування з урахуванням концентрації водню, стрибкоподібний механізм поширення водневих тріщин і закони тепломасопереносу Фіка. З її допомогою досліджена кінетика поширення водневої тріщини розшарування по поверхні сплавлення захисного покриття з основним матеріалом у корпусі реактора гідрокрекінгу нафти.

**Ключові слова:** біметалеві матеріали, високі параметри водню, концентрація водню, коефіцієнт інтенсивності напружень, зона передруйнування, період докритичного росту водневих тріщин, корпус реактора гідрокрекінгу нафти.

Проектний термін тепломеханічного устаткування високого і надвисокого тиску теплових електростанцій, що працює при температурі пари 500...560°C, 100...140 тис. годин. Завдяки запасам міцності, закладеним під час проектування і виготовлення, термін експлуатації до 2002 р. у 35% енергоустановок перевищив 220 тис. годин. З позицій економіки вони можуть експлуатуватися до 320...450 тис. годин. Проте зростання напрацювання супроводжується накопиченням пошкоджень металу, викликаних повзучістю, термічною втомою, особливо воднем, який утворюється за дисоціації пари на металевих поверхнях устаткування. Особливості технології виготовлення і умов експлуатації корпусних деталей у водневовмісних середовищах призводять до частой появи на них протяжних і глибоких тріщин, які можуть викликати непередбачене руйнування. Воднева крихкість металів – причина катастрофічного руйнування також хімічного, нафтовидобувного, транспортного й інших видів обладнання. Його раптовість часто пов'язана не тільки з великими матеріальними збитками, але й людськими жертвами. Останнім часом дослідженням взаємодії водню з конструкційними матеріалами надають особливого значення, що пов'язано із розробками нових виробів у ракетно-літакобудуванні, де водень використовують як паливо.

Проблема водневого окрихчення металевих матеріалів – давно в центрі уваги вчених та інженерів. Опубліковано десятки монографій, де розглядають це явище з різних позицій (див., наприклад, [1–7]). Наведено результати експериментальних досліджень впливу водню на деградацію металевих матеріалів, методи розрахунку міцності і довговічності елементів конструкцій за довготривалого статичного і циклічного навантажень у водневовмісних середовищах тощо. Однак недостатньо висвітлено ріст тріщин у металевих матеріалах за високих параметрів водню (поширення водневих тріщин), що часто є основним механізмом втрати довговічності елементів конструкцій енергетики, літальних апаратів, хімічного, нафтовидобувного, транспортного й інших видів обладнання.

Взаємодіючи з водневовмісними середовищами, метали здебільш втрачають функціональні властивості, тобто деградують. Це необхідно враховувати під час оцінки міцності і довговічності елементів конструкцій, які тісно пов'язані зі закономірностями зародження та росту водневих тріщин різних параметрів. На сьогоднішні дослідні дані про поведінку тріщин у металах під дією водню і можливість їх поширення обмежені. Тому набувають вагомості теоретичні моделі, які дають можливість обґрунтовано прогнозувати зумовлений воднем ріст тріщин для розв'язання багатьох задач під час оцінки роботоздатності та довговічності конструкцій у водневовмісних середовищах високих концентрацій. Нижче запропонована розрахункова модель для дослідження поширення тріщин за високих параметрів водню.

**Формулювання моделі.** Відомо, що метали в умовах дії водневовмісних середовищ руйнуються шляхом зародження і уповільненого росту тріщин. Тому, досліджуючи поширення тріщин у них, зосереджують увагу на побудові залежностей швидкості їх росту  $da/dt$  від коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН)  $K_I$  і концентрації водню  $C_H$  біля їх контурів, з допомогою яких можна визначити кінетику водневої тріщини, ресурс деталі у водневому середовищі, допустимі розміри дефектів, а також інші важливі для оцінки роботоздатності конструкції параметри. Однак відомі підходи або зовсім не враховують впливу взаємозв'язку концентрації водню  $C_H$  у зоні передруйнування з її пружно-пластичним станом на підготовку елементарного акту руйнування, або подають цей зв'язок як складну систему рівнянь із величинами, які складно визначити експериментально, особливо за високих параметрів водню.

Пропонуємо деформаційний підхід для побудови таких залежностей, коли газоподібний чи електролітний водень високих параметрів створює в тілі високу концентрацію. Суть підходу ось у чому. Розглянемо тривимірне пружно-пластичне металеве тіло, що містить плоску дископодібну тріщину радіуса  $a$  (рис. 1а). Вважаємо, що тіло наводнене до надвисокої концентрації водню  $C_H$ , який з тіла дифундує в тріщину і створює там високі тиски  $p(C_H)$ , що призводить до стрибкоподібного її поширення (довжина стрибка  $x_*$ , рис. 1б). Дослідимо його кінетику.

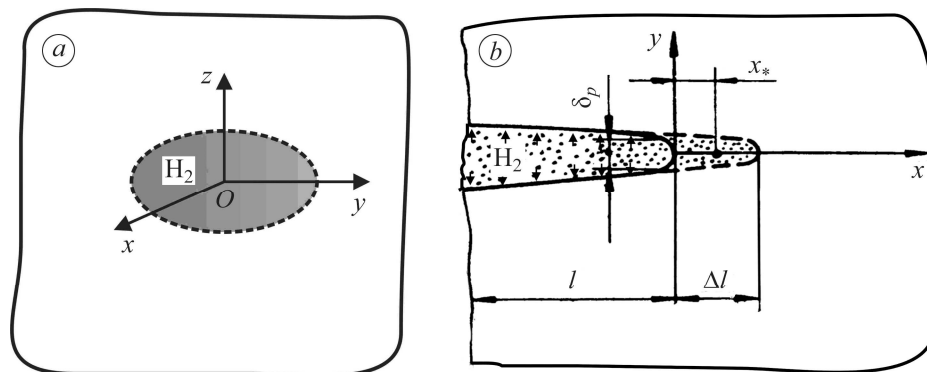


Рис. 1. Схема навантаження тріщини в тривимірному тілі тиском водню:  
 а – загальна схема; б – локальний об'єм навантаження.

Fig. 1. Loading mode of a crack in a three-dimensional body by hydrogen pressure:  
 a – general scheme; b – local volume of load.

Задачу розв'язуємо так. Відомо [1–4], що водень у металах збільшує міцнісні характеристики  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_c$  і знижує пластичність  $\epsilon_c$  ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_c$  – умовні границі текучості та міцності;  $\epsilon_c$  – граничне значення нормальної деформації матеріалу). Тому для дослідження зниження опору матеріалу руйнуванню доцільно застосову-

вати деформаційний підхід. При цьому, враховуючи ефект Горського [4], а також результати експериментальних випроб впливу водню на деформаційні властивості металів (див., наприклад, [4]), залежність деформації  $\epsilon$  металу від тиску водню  $p$  і його концентрації  $C_H$  запишемо так:

$$\epsilon(p, C_H) = \epsilon_1(p) - AC_H(t). \quad (1)$$

Тут  $\epsilon_1(p)$  – деформація металу внаслідок тиску водню  $p$ ;  $t$  – час;  $A$  – константа, яку визначають експериментально для кожного металу і температури випробування. Встановлено [2], що лінійна залежність (1) деформації  $\epsilon$  від величини  $C_H$  існує тільки для малих і середніх концентрацій водню. Розглянемо випадок, коли тиск водню  $p$  характеризує зовнішні довготривалі статичні навантаження. Задача полягає в побудові кінетичного рівняння, яке б описувало сповільнений ріст тріщини, тобто залежність  $a = a(t)$ .

Важливо на цьому етапі встановити умову, яка б дала можливість за розподілом водню в зоні передруйнування і пружно-пластичною ситуацією там визначити момент елементарного акту локального руйнування. Максимальні розтягальні деформації  $\epsilon$  виникають у зоні передруйнування на віддалі розкриття тріщини  $\delta$  від її вершини, а максимальні нормальні напруження – на віддалі  $2\delta$  [2]. Тому область максимальної концентрації водню зсувається на віддаль  $2\delta$  від вершини тріщини. Логічно припустити, що локальної нестійкості метал досягне тут за час  $t_*$  на віддалі від вершини тріщини  $x_* = 2\alpha\delta$ . Величину  $\alpha$ , яка є характеристикою системи метал–водень, слід знайти експериментально. Вважаючи віддаль  $x_*$  за довжину елементарного стрибка тріщини, середню швидкість її росту подамо так:

$$V = \frac{da}{dt} \approx x_* t_*^{-1} = 2\alpha\delta_C t_*^{-1}. \quad (2)$$

Деформацію в зоні передруйнування виразимо через розкриття тріщини  $\delta$  в її тупиковій частині [4]:  $\epsilon = h^{-1}\delta$ , де  $h$  – шуканий коефіцієнт пропорційності. Для визначення часу  $t_*$  елементарного акту руйнування (поширення тріщини) застосуємо деформаційний критерій міцності:

$$\epsilon(p) = \epsilon_c(C_H). \quad (3)$$

Враховуючи рівняння (1), запишемо цю рівність так:

$$\epsilon(p, C_H) = \epsilon_c - A_1 C_H(x_*, t_*). \quad (4)$$

Тут  $\epsilon_c$  – критичне значення деформацій розтягу для металу за відсутності водню;  $A_1$  – константа, яку визначають експериментально [2];  $C_H(x_*, t_*)$  – концентрація водню, що утворюється за час  $t_*$  на віддалі  $x_*$  від вершини тріщини [2]. Так як деформація  $\epsilon$  пропорційна розкриттю у вершині тріщини  $\delta$  [8], то співвідношення (4) можна подати ще так:

$$1 - \delta\delta_C^{-1} = A_2 C_H(x_*, t_*), \quad (5)$$

де  $A_2$  – характеристика, яку знаходять із експерименту;  $\delta_C$  – критичне значення розкриття тріщини. Вважаємо, що тріщина мала і розкриття в її вершині біля зони передруйнування визначимо, як і для задачі Сакка [8], так:

$$\delta = 4ap^2 / \pi\sigma_{0,2}E. \quad (6)$$

Тут  $\sigma_{0,2}$  – границя текучості матеріалу;  $E$  – модуль Юнга [8].

Концентрацію водню  $C_H$  у виразі (5) для заданих умов наводнювання тіла шукаємо на основі законів Фіка [2], а тиск  $p(t)$  у тріщині обчислюємо через його кількість  $M(t)$  та об'єм  $V(t)$  [2]:

$$p^2(t) = \frac{RTM(t)}{V_1}, \quad (7)$$

де  $R$  – газова стала;  $T$  – температура тіла;  $V(t) = p(t)V_1$ ;  $V_1 = 16\pi(1 - \nu^2)a^3/3E$ . Кількість водню  $M(t)$  у тріщині шукаємо із розв’язку задачі дифузії [9]:

$$\partial C_H(z, t) / \partial t = D \partial^2 C_H(z, t) / \partial z^2. \quad (8)$$

При цьому крайові умови на поверхні тріщини задаємо згідно з реальними умовами масообміну між об’ємами тіла і тріщини [9]:

$$[D \partial C_H / \partial z]_{z=0} = \beta(C_H - K_S \sqrt{p}). \quad (9)$$

Тут  $D$  – коефіцієнт дифузії водню;  $K_S$  – константа Сівертса;  $\beta$  – коефіцієнт масообміну.

З розв’язку задачі (8), (9) [9] величину  $M(t)$  можна наближено подати так:

$$M(t) \approx 2\pi a^2 \sqrt{tD\pi^{-1}} [C_H(t) - K_S \sqrt{p(t)}]. \quad (10)$$

Із співвідношень (7) і (10) знаходимо наближено, вважаючи  $[C_H \gg K_S \sqrt{p(t)}]$ , тиск у тріщині:

$$p(t) \approx \left[ \frac{3ERT \sqrt{tD\pi^{-1}} C_H(t)}{8(1 - \nu^2)a} \right]^{0,5}. \quad (11)$$

Для спрощення розв’язку вважаємо, що градієнт зміни концентрації  $C_H$  від часу  $t$  буде набагато менший, ніж градієнт зміни радіуса тріщини  $a$ , тобто за час  $t_*$  можна наближено прийняти, що  $C_H = \text{const}$ . Тоді на основі співвідношень (5)–(7) і (10) отримаємо рівняння

$$t_* = \frac{0,44\pi^3 \delta_C^2 \sigma_{0,2}^2 (1 - \nu^2)^2 [1 - A_2 C_H(t)]^2}{R^2 T^2 D C_H^2(t)}. \quad (12)$$

Підставляючи його у співвідношення (2), для визначення кінетики зміни радіуса  $a(t)$  біжучого контуру тріщини одержимо диференціальне рівняння

$$\frac{da}{dt} = \frac{2,25\alpha R^2 T^2 D C_H^2(t)}{\pi^3 \delta_C^2 \sigma_{0,2}^2 (1 - \nu^2)^2 [1 - A_2 C_H(t)]^2} \quad (13)$$

за початкових умов

$$t = t_0, a(0) = a_0.$$

Інтегруючи його за відповідних початкових умов, обчислимо кінетику поширення водневої тріщини

$$a(t) = a_0 + \frac{0,073\alpha R^2 T^2 D}{\delta_C^2 \sigma_{0,2}^2 (1 - \nu^2)^2} \int_{t_0}^t \frac{C_H^2(t)}{[1 - A_2 C_H(t)]^2} dt, \quad (14)$$

а звідси – кінетику росту макротріщини на межі сплавлення основного металу і наплавки в корпусі реактора гідрокрекінгу нафти (двошаровий матеріал).

**Поширення водневої тріщини на межі сплавлення наплавки і основного матеріалу корпусу реактора гідрокрекінгу нафти.** Для захисту від сірководневої корозії внутрішню поверхню корпусу реактора наплавляють під флюсом аустенітною нержавною сталлю. Посудини для гідрокрекінгу нафти (сталь 2,25Cr–1Mo) працюють у середовищі водню за температури 723 К та тиску 15 МПа. Після на-

плавки їх обробляють за температури 963 К, 24 h. При цьому вуглець дифундує з основного металу в наплавлений шар, утворюючи по межі сплавлення крихкий карбідний прошарок [2], в якому під час експлуатації виникають тріщини, що спричиняють відшарування наплавленого металу від основного. Основним чинником, який сприяє такому руйнуванню, вважають водень [2]. Виявлено, що під час роботи реактора він дифундує назовні, розподіляючись по товщині стінки корпусу пропорційно своїй розчинності у металі наплавленого шару з аустенітною структурою та в основному металі з перлітною. Під час зупинки й охолодження реактора перерозподіляється і аномально накопичується у кількості, що багатократно перевищує межу розчинності. Виділяючись на поверхнях карбідів, водень згідно зі законом Сівертса розвиває великий тиск і викликає руйнування [2].

Реактор – це посудина тиску, виготовлена зі середньолегованої сталі. Її внутрішня поверхня захищена антикорозійною наплавкою з нержавної аустенітної сталі. Товщина основного металу 0,15...0,3 м, наплавки – порядку 0,005...0,01 м. У цьому конкретному випадку основний матеріал корпусу – сталь 15X2МФА-А товщиною  $x_1 = 0,119$  м, а наплавка – сталь 07X25Н13 завтовшки  $x_2 = 0,008$  м (рис. 2).

Під час тривалої експлуатації під тиском водневомісного середовища на внутрішню стінку  $P_0 = 15$  МПа і за температури  $T_1 = 727$  К в корпусі реактора концентрація водню  $C_0(x, t)$  розподіляється так [2]:

$$C_0(x) = \begin{cases} C_e(T_0) \frac{D_\gamma K_{S\gamma} - D_\alpha K_{S\alpha} x / x_\alpha}{D_\gamma K_{S\gamma} + D_\alpha K_{S\alpha} x_\gamma / x_\alpha}, & -x_\gamma \leq x \leq 0; \\ C_e(T_0) \frac{D_\gamma K_{S\gamma} (1 - x / x_\alpha)}{D_\gamma K_{S\gamma} + D_\alpha K_{S\alpha} x_\gamma / x_\alpha}, & 0 \leq x \leq x_\alpha. \end{cases} \quad (15)$$

Тут  $C_e(T_0)$  – поверхнева концентрація водню на внутрішній поверхні корпусу, яку визначають через тиск водню в реакторі за законом Сівертса:  $C_e(T_0) = K_{S\gamma} \sqrt{p_H(t)}$ ;  $D_\gamma, D_\alpha$  – коефіцієнти дифузії водню відповідно для матеріалів 1 і 2 (рис. 2), а  $K_{S\gamma}, K_{S\alpha}$  – коефіцієнти його розчинності відповідно для цих матеріалів. Після цього робочий процес припиняється, тобто тиск спадає до нуля і корпус охолоджується до кімнатної температури з постійною швидкістю  $\dot{T}$ . Вважаємо, що температура змінюється за законом [2]

$$T(x, t) = \begin{cases} T_1 - \dot{T}t, & t \leq 77,4 \text{ ks}, \\ T_0, & t \geq 77,4 \text{ ks}, \end{cases} \quad (16)$$

де  $T_1 = 727,4$  К;  $T_0 = 298$  К. На основі відомих даних [2] побудували аналітичні залежності параметрів  $D_\gamma, D_\alpha, K_{S\gamma}, K_{S\alpha}$  від температури  $T$ :

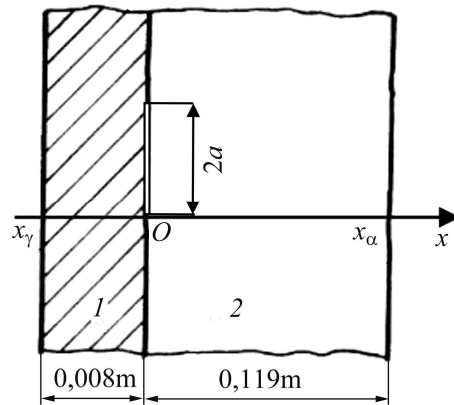


Рис. 2. Схема біметалевої стінки корпусу реактора з круговою тріщиною радіуса  $a$ : 1 – аустенітна сталь 07X25Н13; 2 – середньолегована 15X2МФА-А.

Fig. 2. Scheme of reactor bimetallic wall with a circular crack of radius  $a$ : 1 – austenitic 07X25Н13 steel; 2 – medium alloyed 15X2МФА-А steel.

$$\begin{aligned}
D_\gamma &\approx 3,85 \cdot 10^{-10} + 1,75 \cdot 10^{-12} T + 1,96 \cdot 10^{-15}, \\
D_\alpha &\approx 1,14 \cdot 10^{-8} - 6,22 \cdot 10^{-12} T + 8,59 \cdot 10^{-14}, \\
K_{S\gamma} &\approx -2,92 + 0,01T + 1,15 \cdot 10^{-5} T^2, \\
K_{S\alpha} &\approx 1,58 - 0,01T + 1,12 \cdot 10^{-5} T^2.
\end{aligned} \tag{17}$$

Для визначення зміни з часом  $t$  і геометрією  $x$  концентрації водню  $C_H(x, t)$  у стінці корпусу реактора під час його охолодження сформулюємо таку задачу:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial C_{H\gamma}(x, t)}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_\gamma(x, t) \frac{\partial C_{H\gamma}(x, t)}{\partial x} \right], \quad \frac{\partial C_{H\alpha}(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_\alpha(x, t) \frac{\partial C_{H\alpha}(x, t)}{\partial x} \right], \\
C_{H\gamma}(x, 0) &= C_{H\alpha}(x, 0) = C_0(x), \quad C_H(-x_\gamma, t) = C_H(x_\alpha, t) = 0, \\
\left[ D_\gamma \frac{\partial C_{H\gamma}(x, t)}{\partial x} \right]_{x \rightarrow 0} &= \left[ D_\alpha \frac{\partial C_{H\alpha}(x, t)}{\partial x} \right]_{x \rightarrow 0}, \quad \left[ \frac{C_{H\gamma}(x, t)}{K_{S\gamma}} = \frac{C_{H\alpha}(x, t)}{K_{S\alpha}} \right]_{x \rightarrow 0}, \\
C_H(x, t) &= C_{H\gamma}(x, t), \quad -x_\gamma \leq x \leq 0; \quad C_H(x, t) = C_{H\alpha}(x, t), \quad 0 \leq x \leq x_\alpha,
\end{aligned} \tag{18}$$

де  $C_{H\gamma}$ ,  $C_{H\alpha}$  – концентрація водню в наплавці і в основному металі відповідно.

На момент охолодження до кімнатної температури на межі поділу двох матеріалів ( $x = 0$ ) досягається концентрація водню  $C_H(0, t)$ , яка спочатку зростатиме, а потім зменшується. З розв'язку задачі (18) за швидкості охолодження  $\dot{T} = 80^\circ\text{C/h}$  знайдемо залежність  $C_H(t)$ :

$$C_H(0, t) \approx 250[265,796 - 0,0140536(t - 16,6837)^3 - 3,51414t + 45\ln(t)]. \tag{19}$$

Надалі вважаємо, що на межі сплавлення наплавки з основним металом є дископодібна тріщина початкового радіуса  $a_0$  (рис. 2). Дифузійні характеристики і параметри розчинності водню двох складників біметалу різні, але тут наближено вважатимемо їх приблизно рівними і такими, що сприяють найбільшій дегазації водню в тріщину з найближчих об'ємів, тобто матеріал 2 також вважаємо неіржавним. Отримана при цьому похибка піде в запас довговічності біметалу з тріщиною. Тому концентрація водню  $C_H(0, t)$  у біметалі, яку визначає формула (19), створюватиме тиск  $p(t)$  у тріщині, не менший, ніж в одношаровому корпусі. На основі цього для визначення кінетики поширення тріщини розшарування отримуємо такі співвідношення:

$$\begin{aligned}
a(t) &= a_0 + F(t), \\
F(t) &= \frac{6,25 \cdot 10^4 \alpha R^2 T^2 D}{\delta_C \sigma_{0,2}^2 (1 - \nu^2)^2} \int_{t_0}^t \frac{[265,79 - 0,014(t - 16,68)]^3 - 3,51t + 45\ln(t)]^2}{\{1 - A_2[265,79 - 0,014(t - 16,68)]^3 - 3,51t + 45\ln(t)\}^2} dt.
\end{aligned} \tag{20}$$

Тут константи  $\alpha$ ,  $\delta_C$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $R$ ,  $T$ ,  $D$ ,  $\nu$  вибираємо такими, як для матеріалів корпусу гідрокрекінгу нафти, тобто

$$\begin{aligned}
\alpha &\approx 4 \cdot 10^{-3}, \quad \delta_C = 5,409 \cdot 10^{-5} \text{ м}, \quad \sigma_{0,2} = 600 \text{ МПа}, \\
R &= 7,84 \cdot 10^{-6} \text{ МПа} \cdot \text{м}^3 / (\text{mol} \cdot \text{К}), \quad T = 293 \text{ К},
\end{aligned} \tag{21}$$

$$D = 9 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}, \quad \nu = 0,3,$$

$$A_2 C_H \approx 0,5, \quad \text{якщо } C_H(t) \geq 5 \text{ ppm}.$$

Тут також задаємо величину  $t_0$ , що відповідає періоду зародження водневої тріщини, тобто  $t_0 \approx 2,78 \text{ h}$ , а радіус початкової вибираємо за розміром водневої тріщини [2] як  $a_0 \approx 0,01 \text{ м}$ .

На основі співвідношень (20) і (21) побудували (рис. 3) залежність  $a(t)$  росту тріщини розшарування на поверхні сплавлення захисного покриття і основного матеріалу корпусу реактора гідрокрекінгу нафти. Виявили, що надвисокі концентрації водню, що утворюються в стінці реактора за його швидкісного охолодження, можуть викликати руйнування матеріалу без додаткових силових навантажень.

**Діагностика поширення тріщини розшарування з допомогою сигналів акустичної емісії.** Водневі тріщини, як правило, зароджуються і поширюються в середині об'єму матеріалу, через що візуальна діагностика неможлива. Тому для цього спробували використати різні методи неруйнівного контролю. Найефективнішим виявився метод акустичної емісії [10–14]. Побудуємо розрахункову модель для визначення кінетики поширення таких тріщин через параметри сигналів акустичної емісії (САЕ), які вимірюють безпосередньо на поверхні досліджуваного елемента. Суть моделі ось у чому.

Як відомо [10–14], площу  $S$  новоутворених дефектів (площа підростання тріщини) можна визначити через суму амплітуд  $A_i$  сигналів АЕ:

$$S = \beta \sum_{i=1}^n A_i . \quad (22)$$

Тут  $\beta$  – акустико-емісійна константа матеріалу, яку визначають із експерименту [14];  $n$  – кількість подій сигналів САЕ, зареєстрованих під час поширення тріщини.

Як відомо [2], стрибки підростання воднево-механічної тріщини вздовж її контуру для мікроізотропного матеріалу можна вважати наближено однаковими за різних інкубаційних періодів їх підготовки. Тому площі  $s_i$  мікроруйнування, які генерує кожна подія САЕ, будуть у середньому однакові (тут їх приймаємо як мікрокруги; див. рис. 4;  $s_i \approx \text{const} = s_a$ ).

Отже, можна записати, що

$$A_i \approx \text{const} = A_a , \quad S(t) = s_a n(t) = \beta \sum_{i=1}^n A_i \approx \beta A_a n(t) . \quad (23)$$

Тут  $n(t)$  – функція, що визначає кількість подій САЕ за час  $t$ . Для розглядуваного випадку формулу (23) можна подати ще так:

$$S(t) = m\beta A_A + \beta A_a n(t) , \quad (24)$$

де  $m$  – кількість дискретних подій САЕ з амплітудами  $A_A > A_a$ , що відповідає зародженню водневої тріщини [2].

На основі формул (20) і (24) запишемо співвідношення

$$S_0 = \pi a_0^2 = m\beta A_A , \quad S_D(t) = \pi F^2(t) = \beta A_a n(t) , \quad S(t) = \pi a_0^2 + \pi F^2(t) . \quad (25)$$

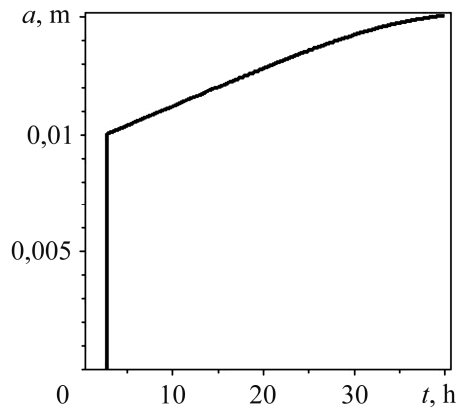


Рис. 3. Залежність  $a(t)$  кінетики росту тріщини розшарування в стінці корпусу реактора.

Fig. 3. Dependence  $a(t)$  of the kinetics of separation crack growth in the reactor wall.

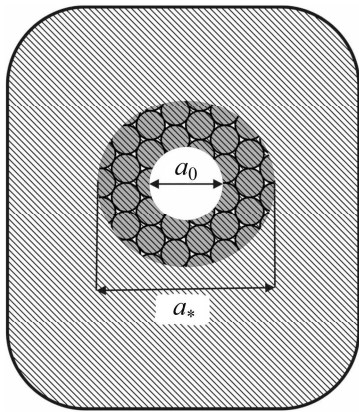


Рис. 4. Fig. 4.

Рис. 4. Переріз тіла по площині розміщення тріщини початкового радіуса  $a_0$  і кінцевого  $a_*$ : світлий круг – початкова тріщина; кільце – площа докритичного її росту; маленькі круги в кільці – мікроруйнування, які генерують САЕ.

Fig. 4. Cross-section of a body along the plane of location of the crack of radius  $a_0$  and final  $a_*$ : light circle – initial crack; ring – area of subcritical crack growth; small circles in the ring – microfractures, generated by SAE.

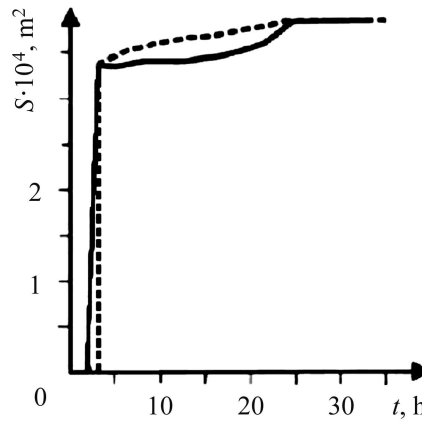


Рис. 5. Fig. 5.

Рис. 5. Порівняння експериментальних (суцільна лінія) і розрахункових (штрихова) залежностей росту площі  $S$  водневої тріщини від часу  $t$ .

Fig. 5. Comparison of experimental (solid line) and calculated (dotted line) dependences of the growth areas  $S$  of hydrogen crack on time  $t$ .

У працях [12, 13] наведені результати досліджень водневого розшарування біметалевих зразків циліндричної форми, які за структурою і композицією матеріалів повністю відповідали корпусу реактора гідрокрекінгу нафти. Зразки наводнювали і охолоджували за тих параметрів, що відповідають технологічній роботі реактора. Зародження і просування водневої тріщини на межі наплавки і основного матеріалу контролювали за допомогою устаткування для фіксації САЕ в часі. За відомою методикою [11–14] визначали константу  $\beta$ . За отриманими даними і формулою (24) побудували залежність  $S(t)$  (рис. 5), а за формулами (20) і (25) – відповідну розрахункову для заданих параметрів експериментальних досліджень. Їх порівняння свідчить про коректність запропонованої розрахункової моделі і підтверджує достатню точність її результатів.

## ВИСНОВКИ

Сформульована розрахункова модель для визначення кінетики поширення в тілі водневих тріщин, що спричинено високими тисками в них через надвисокі концентрації водню в тілі. Модель застосована для встановлення кінетики поширення водневої тріщини розшарування по поверхні сплавлення захисного покриття з основним матеріалом в корпусі реактора гідрокрекінгу нафти. Коректність і точність моделі підтверджена результатами експериментальних досліджень кінетики поширення таких тріщин методом акустичної емісії.

**РЕЗЮМЕ.** Предложена расчетная модель для определения кинетики распространения в теле водородных трещин, вызванных высокими давлениями в них вследствие сверхвысоких концентраций водорода в теле. В основе модели – деформационный критерий механики разрушения с учетом концентрации водорода, механизм скачкообразного распространения водородных трещин и законы теплопереноса Фика. С ее помощью ис-



слідована кінетика розповсюдження водородної тріщини по поверхності сплавлення захисного покриття з основним матеріалом в корпусі реактора гідрокрекінга нафти.

*SUMMARY.* A calculation model for determining kinetics of hydrogen cracks propagation in the metal body, caused by high-pressures in them due to super-high hydrogen concentration in a body is proposed. The model is based on the deformation criterion of fracture mechanics with account of hydrogen concentration, the mechanism of a jump-like propagation of hydrogen cracks and also Fick's law of heat mass transfer. Using this model the kinetics of hydrogen crack propagation over the protective coating fusion surface with the base material in oil hydro-cracking reactor case is investigated.

1. *Murakami, Yu.* Effect of hydrogen on fatigue crack growth in metals // Proc. 17<sup>th</sup> Eur. Conf. on Fracture, ECF-17: "Multilevel Approach to Fracture of Materials, Components and Structures", Brno, Czech Republic, 2008. – CD ROM. – P. 25–42.
2. *Андрейків О. Є., Гембара О. В.* Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневовмісних середовищах. – К.: Наук. думка, 2007. – 346 с.
3. *Андрейків О. Є., Никифорчин Г. М., Ткачов В. І.* Міцність і руйнування металевих матеріалів і елементів конструкцій у водневовмісних середовищах // Фізико-механічний інститут: поступ і здобутки / Під ред. В. В. Панасюка. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2001. – С. 248–286.
4. *Андрейків О. Є.* Довговічність металевих матеріалів у водневовмісних середовищах // Прогресивні матеріали і технології. – 2003. – № 2. – С. 423–439.
5. *Андрейків О. Є., Скальський В. Р., Гембара О. В.* Метод оцінки високотемпературного водневого руйнування біметалевих елементів конструкцій // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1980. – № 4. – С. 15–23.
6. *Influence of hydrogen-containing environments on fatigue crack extension resistance of metals / V. V. Panasyuk, O. Ye. Andreykiv, O. I. Darchuk, and N. V. Kuznyak // Handbook of Fracture Crack Propagation in Metallic Structures. – Amsterdam: Elsevier, 1994. – 2. – P. 1205–1242.*
7. *Panasyuk V. V., Andreykiv O. Ye., and Gembara O. V.* Hydrogen degradation of materials under long-term operation of technological equipment // Int. J. Hydrogen Energy. – 2000. – № 25. – P. 67–74.
8. *Панасюк В. В., Андрейків А. Е., Партон В. З.* Основы механики разрушения. – К.: Наук. думка, 1988. – 488 с.
9. *Банашевич Ю. В., Гембара О. В., Андрейків О. Є.* Розрахунок кінетики поширення водневих блістерів у нафтогазовому устаткуванні // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – № 5. – С. 17–25.
10. *Лисак М. В., Скальський В. Р.* Вплив швидкості охолодження матеріалів реактора гідрокрекінгу нафти на тріщиноутворення // Там же. – 1993. – № 6. – С. 105–107.
11. *Скальський В. Р., Андрейків О. Є., Сергієнко О. М.* Оцінка водневої пошкодженості матеріалів за амплітудами сигналів акустичної емісії // Техн. діагностика и неруйн. контроль. – 1999. – № 1. – С. 17–27.
12. *Водородное растрескивание металлов и сплавов и его акустико-эмиссионный контроль / А. Е. Андрейків, Н. В. Лысак, В. Р. Скальський и др. // Физ.-хим. механика материалов. – 1992. – № 4. – С. 63–69.*
13. *Скальський В. Р.* Влияние водорода на растрескивание металлов и контроль таких процессов методом АЭ // Техн. диагностика и неразр. контроль. – 1995. – № 1. – С. 52–65.
14. *Андрейків А. Е., Лысак Н. В.* Метод акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения. – К.: Наук. думка, 1980. – 176 с.

Одержано 15.09.2014