

О. Гембара

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

Т. Гембара

Канд. техн. наук,
Львівський державний інститут
новітніх технологій та управління
ім. В. Чорновола,
м. Львів

О. Чепіль

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

УДК 669.778

РОЗРАХУНОК ЗАЛИШКОВОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ У СЕРЕДОВИЩІ ГАЗОПОДІБНОГО ВОДНЮ

*І аааааіі аеаіідеіі дісдаоіеіе аеаі аіоа еііподоіеіе іа одеаеі і іоііноі са поаа³⁰р
соі іаеаііаі аіаіаі аіедеіе-ііаі діпдоі одііеі о іааеаі. І а ааі аіаааіе-ііаі
едеіаіііі діеі оааі іу іодеі аіі еііаде-іі³ діаіуі іу, іі аароі і іаеіаііоі іоіірааде
еііадеі іііедеі іу аіаіаі; одііеіе а саеіаеііііі³ аіа іадаі аодіа іаааі оааі іу,
аіі аодіе-ііе дісі ііа одііеіе³ оііеі-іі³ іе оа і іоіііеі оадаеіадеііеі і аодііаеі,
саеіеііаеі діпдоі ііаіііііііеі о аіаіі аеаі аіоа еііподоіеіе, аіііііііі дісі ііе
аеуаеаі іе ааоаеіа са оі-іе сіііо іі аіаіааіаі діеі оааі іу³ саааі іаі діпдоііі.*

елемент конструкції, концентрація водню, залишковий ресурс

Проблема оцінки та прогнозування працездатності елементів конструкцій тривалої експлуатації, які експлуатуються в умовах складного багаторежимного термосилового навантаження і дії воденьмісного середовища, пов'язана з утворенням у них тріщин водневого походження. Для таких конструкцій недостатньо проводити розрахунки для одного з режимів роботи, який з тих чи інших міркувань вважається найнебезпечнішим. Для вірогідності прогнозу працездатності треба проаналізувати всю історію взаємодії з воднем і зміну температурного та напружено-деформованого стану (НДС) конструкції за всіма елементами циклів "пуск — номінальний режим — зупинка (штатна чи аварійна)". Це зумовлено тим, що на будь-якому з етапів може скластися катастрофічне поєднання зовнішніх впливів і чинників водневої деградації металів.

Алгоритм розрахунку елементів конструкцій на тривалу міцність за стадією зумовленого воднем докритичного росту тріщин у металах. Розрахунок конструкцій на міцність та довговічність в умовах складного багаторежимного термосилового навантаження і взаємодії з воденьмісним середовищем передбачає такі основні етапи:

— аналіз умов експлуатації конструкції та можливих причин її руйнування;

— визначення зміни температурного поля та перерозподілу водню в металі у найнебезпечніших перерізах конструкції на кожному режимі експлуатації;

— дослідження напружено-деформованого стану в околі дефекту і визначення розрахункових параметрів, що контролюють цей стан: КІН, розкриття тріщини тощо;

— експериментальне встановлення характеристик тріщиностійкості матеріалу у водні;

— дослідження кінетики руйнування, тобто докритичного підростання водневих тріщин, і на цій основі визначення залишкового ресурсу конструкції.

Завдання першого етапу полягає в отриманні потрібних для розрахунку вихідних даних про особливості навантаження матеріалу в конструкції і його взаємодії з воденьмісним середовищем. На основі даних про робочі процеси і режими (механічні навантаження, температурні поля, наявності водню, параметри середовища) з врахуванням інформації про чутливість матеріалу до впливу водню спочатку в елементах конструкцій виділяють воднебезпечні зони — області, де відбувається контакт

водню з металом, причому при таких параметрах (температурі, рівні активності водню), коли проявляється зумовлена воднем деградація металу в будь-якому вигляді.

Вихідні дані повинні містити також характеристику існуючих у конструкції дефектів: їх розташування, форму, розміри тощо. Ці параметри визначають в залежності від можливості виявлення існуючими засобами контролю, або на основі даних про типові дефекти.

При розрахунках слід враховувати також і те, що конструкція може містити і невиявлені, пропущені при контролі дефекти. При цьому, за правило, вважають, що конструкція містить найнебезпечніший тип дефекту — тріщину, розташовану у воднебезпечній зоні самим несприятливим чином відносно діючих напружень, властивостей матеріалів, інших чинників.

Отримані на першому етапі дані складають основу розрахункової схеми, що зводить визначення міцності та залишкового ресурсу конструкції до розв'язання деякої модельної задачі або декількох таких задач про гранично-рівноважний стан і кінетику розвитку вихідного дефекту в дослідному конструктивному елементі за заданих умов його навантаження.

Другий етап полягає у визначенні зміни температурного поля, моделюванні й дослідженні накопичення та перерозподілу водню в металі в найнебезпечніших перерізах конструкції на кожному режимі експлуатації. Зумовлено це потребою в аналізі виникнення зон в елементах конструкцій, перенасичених воднем і небезпечних з погляду можливості водневих пошкоджень (тріщин).

Такі дослідження повинні включати послідовний розв'язок задач теплопровідності, а потім — дифузії водню за відповідних умов.

Третій етап полягає у дослідженні НДС в околі дефекту і визначенні розрахункових параметрів, що контролюють цей стан: КІН, розкриття тріщини та ін. Такі задачі, особливо в тривимірній постановці, досить складні в математичному плані. Так, замкнений розв'язок для визначення δ -розкриття вдалося отримати лише для найпростіших конфігурацій тріщин у необмежених тілах [1, 5]. Значно більший розвиток отримали методи визначення КІН. Найповніший огляд у цьому напрямі результатів поданий у [6].

Четвертий етап розрахунку ресурсу полягає в експериментальному дослідженні характеристик тріщиностійкості матеріалу у водні. В механіці руйнування розроблено достатньо методів для реалізації цього етапу.

Нехай l_i — характерний лінійний розмір початкового дефекту, визначений дефектоскопічними засобами, і встановлена величина КІН для цього елемента конструкції. Тоді на основі даних про тріщиностійкість матеріалу визначають граничні розміри тріщини [5], а саме: граничний розмір l_0 тріщини, що не росте за експлуатаційного навантаження, тобто виконується умова $K_I(l_0) = K_{Ith}^{(H)}$; критичний розмір тріщини l_c , з якого починається катастрофічний її розвиток, тобто виконується умова $K_I(l_c) = K_{Ic}$.

Тріщини, розмір яких l_i знаходиться в інтервалі $l_0 < l_i < l_c$, за заданих умов експлуатації можуть рости. Ріст такої тріщини визначає залишковий ресурс елемента конструкції, який оцінюється з розв'язку рівняння

$$\frac{dl}{dt} = v(K_I, C_H), \quad (1)$$

де v — швидкість росту тріщини.

Отже, п'ятий етап полягає у дослідженні кінетики руйнування, тобто докритичного підростання водневих тріщин і на цій основі визначення залишкового ресурсу конструкції.

Існуючий об'єм даних про кінетику зумовленого воднем росту тріщин у металах є досить обмеженим, так як і можливості його поповнення. Тому на практиці потрібні для розрахунків набори експериментальних характеристик тріщиностійкості недостатньо повні для заданих діапазонів зміни експлуатаційних впливів. У таких випадках розробляють теоретичні підходи.

Визначення швидкості росту тріщини під дією водню та довготривалого статичного навантаження. Розглянемо пружно-пластичну ізотропну пластину, яка містить макротріщину довжиною l і піддана дії напружень розтягу p і воденьмісного середовища, яке створює біля вершини тріщини концентрацію водню C_S .

Згідно з експериментальними даними [5], воднева макротріщина росте послідовними стрибками. Середній період $\Delta t = t_*$ здійснення циклу формування передумов руйнування — накопичення водню — утворення мікротріщини буде періодом повторення стрибків, який разом з їхньою середньою довжиною $\Delta l = x_*$ визначатимуть середню макроскопічну швидкість поширення магістральної тріщини

$$v = \frac{x_*}{t_*}. \quad (2)$$

У праці [3] для цього випадку на основі енергетичного підходу отримали рівняння балансу швидкостей у вигляді

$$\frac{\partial l}{\partial t} = \frac{B \sigma_0 \int_0^{l_p} \left. \frac{\partial C_H(x, t)}{\partial t} \right|_{t=t_*} dx}{\gamma_0 - \gamma_p}, \quad (3)$$

де l_p — довжина пластичної зони в околі вершини тріщини; $\gamma_p = \sigma_0 \delta$ — питома енергія пластичних деформацій при статичному навантаженні; δ — розкриття вершини тріщини при навантаженні; σ_0 — усереднені нормальні напруження, що виникають у зоні передруйнування, згідно з відомою [5] δ_c -моделлю квазікрихкого руйнування матеріалу з тріщиною.

Питому енергію руйнування подамо у вигляді $\gamma_0 = \sigma_0 \delta_c$, де δ_c — критичне розкриття вершини тріщини.

У результаті отримали рівняння для визначення швидкості росту водневої тріщини

$$\frac{\partial l}{\partial t} = \frac{B \int_0^{l_p} \left. \frac{\partial C_H(x, t)}{\partial t} \right|_{t=t_*} dx}{\delta_c - \delta}. \quad (4)$$

Концентрацію водню в зоні передруйнування, згідно з [6], визначаємо зі співвідношення

$$C(x,t) = \frac{2C_S \sqrt{\tau} \exp[2m\xi - (4\tau)^{-1}\xi^2]}{\xi \sqrt{\pi} \exp m\xi + 2\sqrt{\tau} \exp(-0.25\xi^2 \tau^{-1})}, \quad (5)$$

де $\xi = x(2\delta)^{-1}$; $\tau = Dt/(2\delta)^2$; $m = 0,9\sigma_T V_H / RT$; D — коефіцієнт дифузії водню в метали; V_H — парціальний молярний об'єм водню в метали; R — універсальна газова стала.

Далі потрібно визначити середню довжину x_* стрибка тріщини. Встановлено [4, 5], що найчутливішими до впливу водню є деформаційні характеристики. В деяких випадках деформаційні параметри різко зменшуються при збільшенні концентрації водню в метали. Тому скористаємося деформаційним критерієм міцності для встановлення умов локального руйнування. Вважаємо, що за час t_* тріщина підросте на величину x_* , якщо при заданому навантаженні в точці $x = x_*$ виконуватиметься рівність

$$\varepsilon_H(x_*, p) = \varepsilon_c(p) - BC(x_*, t_*), \quad (6)$$

де $\varepsilon_c(p)$ — граничне значення деформації матеріалу при його руйнуванні без впливу водню.

Деформацію в зоні передруйнування як в наводненому, так і в ненаводненому матеріалі визначаємо через розкриття δ тріщини, тобто вважаємо, що [5]

$$\varepsilon_H(x_*, p) = \frac{\delta}{h}, \quad \varepsilon_c(p) = \frac{\delta_c}{p}, \quad (7)$$

де h — деякий коефіцієнт пропорційності.

Тоді з врахуванням (2), (5) — (7) отримуємо умову для визначення x_* :

$$1 - \frac{\delta}{\delta_c} = \alpha C\left(x_*, \frac{x_*}{v}\right), \quad (8)$$

де $\alpha = Bh/\delta_c$.

Після певних математичних перетворень з (5), (8) отримали співвідношення для визначення довжини елементарного стрибка тріщини:

$$x_* \approx \frac{8\alpha C_S D \delta_c \lambda (1-\lambda) + 4D\alpha^2 C_S^2 \delta_c \lambda + 4D\delta_c \lambda (1-\lambda)^2}{8\alpha^2 C_S^2 Dm + 8\alpha C_S Dm(1-\lambda) + \delta_c \lambda \pi v (1-\lambda)^2};$$

$$\lambda = \frac{\delta}{\delta_c}. \quad (9)$$

Далі, враховуючи (2), (4), (5) і (9), отримали рівняння для визначення швидкості росту тріщини у вигляді

$$v = \left(8B\alpha C_S^2 Dm\delta_c \lambda (\alpha C_S + (1-\lambda)) \left(\exp\left(\frac{ml_p}{\delta_c \lambda}\right) - 1 \right) - 8D\delta_c \lambda m(1-\lambda) \left(2\alpha C_S (1-\lambda) + (1-\lambda)^2 + \alpha^2 C_S^2 \right) \right) / \left(32\alpha C_S m^2 a \delta_c \lambda (1-\lambda) (\alpha C_S + (1-\lambda)) - \right.$$

$$\left. - BC_S \delta_c^2 \lambda^2 \pi (1-\lambda)^2 \left(\exp\left(\frac{ml_p}{\delta_c \lambda}\right) - 1 \right) \right). \quad (10)$$

Для визначення залишкового ресурсу елемента конструкції до рівняння (1), (10) додамо такі початкову й кінцеву умови:

$$t = 0, l(0) = l_0; \quad (11)$$

$$t = t_*, l(t_*) = l_*, \quad (12)$$

де критичну довжину $l = l_*$ визначаємо з умови $K_I(l_*) = K_{Ic}$.

Таким чином, за відомих характеристик матеріалу $\delta_c, \alpha, B, D, C_S, m$ тривалість докритичного підростання водневих тріщин визначають на основі співвідношень (1), (10) — (12).

Розрахунок залишкової довговічності елементів водневого двигуна в середовищі водню. Розглядаємо циліндричну деталь двигуна на водневому паливі, в середині якого міститься під тиском водень. Взаємодія цієї конструкції з прилягаючими до неї вузлами еквівалентна прикладенню в торцевих перерізах згинального моменту M разом з осьюю і поперечною силами P і S (рис. 1). Очевидною воднебезпечною зоною в деталі буде найнесприятливіша область розташування концентратора напружень — кільцевої проточки. Умови експлуатації: $T = 350$ К, $P_{H_2} = 30$ МПа. Матеріал конструкції — високоміцна сталь, для якої відома діаграма статичної тріщиностійкості (рис. 2).

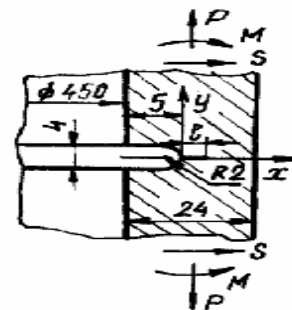


Рис. 1. Фрагмент робочого циліндра двигуна на водневому паливі

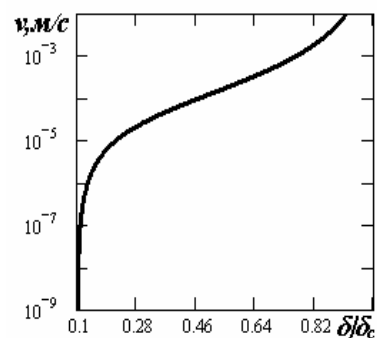


Рис. 2. Залежність швидкості росту тріщини від її розкриття

Механічні характеристики сталі для температур експлуатації були такими: $E=186,4$ ГПа; $\sigma_T = 953$ МПа; $\sigma_s = 993$ МПа; $\psi = 0,66$; $K_{Ic} = 130$ МПа $\sqrt{м}$.

Розрахунок на міцність з врахуванням впливу водню на матеріал проводився після визначення НДС в елементі, який у цьому випадку вважається відомим і вказує, що найнебезпечнішими будуть тріщини в мінімальному перерізі (в площині $y = 0$ на рис. 1).

Для таких тріщин на основі скінченноелементного розв'язку задачі про НДС у тілі, з урахуванням тиску проникаючого в них газу, отримана наближена формула для КІН [7]:

$$K_I = \sqrt{\pi l} (A_0 + A_1 l + A_2 l^2), \quad (0 \leq l \leq 7) \text{ мм}, \quad (13)$$

де глибина тріщини l вимірюється від дна концентратора; $A_0 = 986$ МПа; $A_1 = -136$ МПа/м; $A_2 = 59,3$ МПа/м².

Наведені дані складають вхідну інформацію для розрахунку на водневу міцність. Далі зі співвідношення (10) знайдена розрахункова діаграма статичної тріщиностійкості розглянутої сталі в робочих умовах, де $\delta_c = 5,409 \cdot 10^{-5}$ м, $D = 9 \cdot 10^{-10}$, $m = 0,5969$ м²/с, $BC_S = 13,099$, $\alpha C_S = 0,3845$, $K_{Ih}^{(H)} = 40$ МПа $\sqrt{м}$.

Після цього методом Рунге-Куты розв'язували рівняння (1) з урахуванням (10) за початкової умови $t = 0$, $l = l_0$ ($K_I(l_0) = K_{Ih}^{(H)}$) і кінцевої умови $t = t_d$, $l = l_c$ ($K_I(l_c) = K_{Ic}$).

У результаті проведеного розрахунку виявилось таке. Хоча розглянутий елемент втрачає несучу здатність за наявності в ньому тріщини глибиною понад l_c (K_{Ic}) = 5,7 мм, але не поширюватимуться під впливом середовища водню експлуатаційних параметрів лише тріщини з розмірами меншими, ніж 0,64 мм (рис. 3). Як бачимо, конструкція досить міцна за звичайних умов, але під впливом водню може стати непрацездатною.

Оцінка залишкового ресурсу реактора гідрокрекінгу нафти. Ця методика використовувалася при дослідженні працездатності та оцінки ресурсу реактора гідрокрекінгу нафти. Корпус реактора виготовлений з феритної сталі 2,25Cr-1Mo (табл. 1) товщиною 0,19 м, має захисну наплавку з нержавіючої аустенітної сталі товщиною 0,008 м. Після тривалої роботи в умовах високотемпературного наводнювання реактора при тиску середовища у ньому 16 МПа і температурі 723 К процес зупиняється, тобто тиск знімається і відбувається охолодження до температури довкілля.

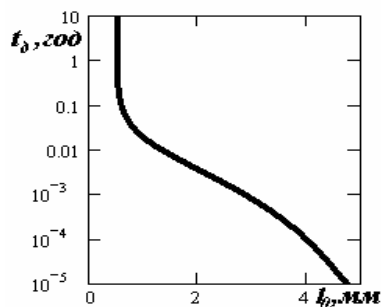


Рис. 3. Діаграма довговічності циліндричної деталі двигуна на водневому паливі

Хімічний склад сталі 2.25Cr-1Mo, мас %

C	0,14
Mn	0,50
P	0,007
S	0,006
Si	0,04
Cr	2,43
Mo	1,01
Ni	0,16
Cu	0,06

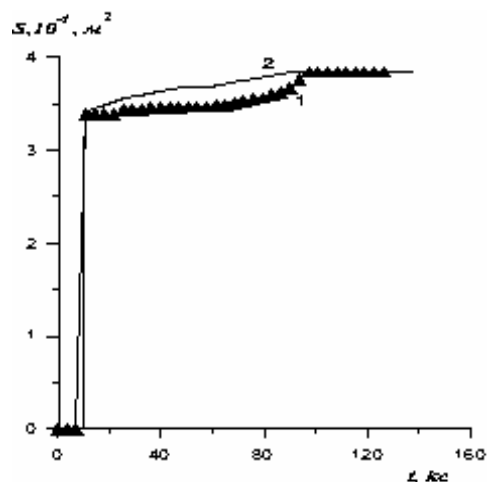


Рис. 4. Часова зміна площі внутрішньої тріщини у біметалевій стінці корпусу реактора: 1 — експериментальна, 2 — розрахунок

Встановлено, що найнебезпечнішими можуть бути перехідні теплові режими, під час яких приховано всередині стінки корпусу реактора виникають і розвиваються водневі пошкодження (рис. 4) [2]. Для таких дефектів встановлено, що $K_I = 2P\sqrt{l}/\pi$. Викликані вони перенасиченням металу воднем за рахунок дії нестационарних неоднорідних температурних полів, які породжують неоднорідні зміни розчинності водню у металі, та створенням надрівноважних тисків у внутрішніх дефектах (рис. 5).

Величина такого перенасичення та внутрішнього тиску залежить від швидкості теплових процесів, характеристик абсорбції водню металами та розмірами областей, що відрізняються розчинностями водню. Всі ці чинники потрібно враховувати як при проектуванні й розрахунках на міцність і довговічність унструкцій, так і при встановленні допустимих режимів їхньої роботи.

У праці [7] експериментально побудована діаграма статичної тріщиностійкості (рис. 6) для сталі 2.25Cr-1Mo за таких умов експлуатації: $T = 450$ °C, $P_{H_2} = 16$ МПа.

Зі співвідношення (10) знайдена розрахункова залежність швидкості росту тріщини від її розкриття (рис. 6), де $\delta_c = 2,069 \cdot 10^{-4}$ м, $D = 2 \cdot 10^{-9}$ м²/с, $m = 0,2335$, $\sigma_T = 426$ МПа, $K_{Ic} = 170$ МПа $\sqrt{м}$, $BC_S = 1,5197$, $\alpha C_S = 4,1667$. Далі, аналогічно як і в попередньому прикладі, методом Рунге-Куты розв'язували рівняння (1)

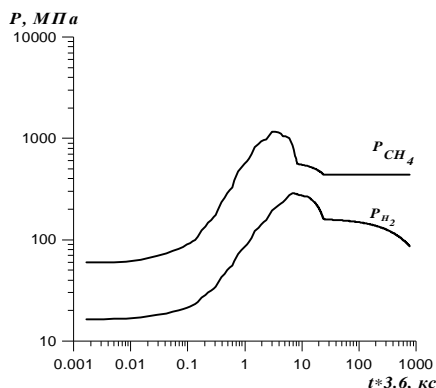


Рис. 5. Розрахункова часова зміна тиску газів у внутрішньому дефекті

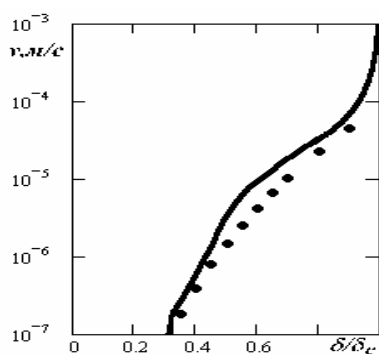


Рис. 6. Діаграма статичної тріщиностійкості для сталі 2.25Cr-1Mo: лінія — розрахункова за (10), крапки — експериментальна згідно з даними [7]

з урахуванням (10) за початкової умови $t=0$, $l=l_0$ ($K_I(l_0)=K_{Ih}^{(H)}$) і кінцевої умови $t=t_d$, $l=l_c$ ($K_I(l_c)=K_{Ic}$) та побудували залежність часу докритичного підростання тріщини від її початкового розміру.

Отже, запропонована розрахункова модель дає можливість визначати кінетику водневої тріщини, залишковий ресурс працюючих у водні елементів конструкцій, допустимі розміри виявлених дефектів з точки зору їхнього водневого руйнування і заданого ресурсу.

Література

1. Андрейкив А.Е. Пространственные задачи теории трещин. — К.: Наук. думка, 1982. — 245 с.
2. Андрейкив О.Є., Гембара О.В. Розрахунок ресурсу елементів реактора гідрокрекінгу нафти // Машинознавство. — 1998. — №4/5. — С. 5—8.

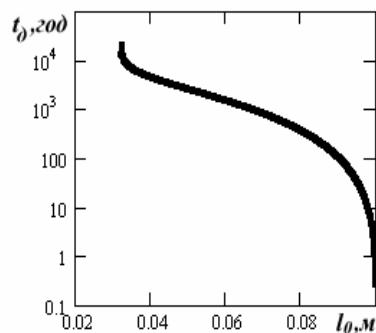


Рис. 7. Діаграма довговічності елементу реактора гідрокрекінгу нафти з тріщиною

3. Гембара О. Розрахункова модель зумовленого воднем росту тріщин у металах / Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій / Під заг. ред. В.В. Панасюка. — Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2004. — С. 551—556.

4. Механіка водородного охрупчівання металлов и расчет элементов конструкций на прочность / А.Е. Андрейкив, В.В. Панасюк, Л.И. Поляков, В.С. Харин. — Львов, 1987. — 54 с. — (Препринт ФМИ АН УССР, №133).

5. Панасюк В.В. Механіка квазіхрупкого руйнування матеріалів. — К.: Наук. думка, 1991. — 416 с.

6. Саврук М.П. Механіка руйнування і прочність матеріалів: Справ. пособ.: В 4 т. — К.: Наук. думка, 1988. — Т. 2. — 620 с.

7. Iwadata T., Nomura T., Watanabe J. Hydrogen Effect on Remaining Life of Hydroprocessing Reactors // Corrosion. — 1998. — №2. — P. 103—112.

Отримана 23.05.07

O. Gembara, T. Gembara, O. Chepil
Calculation of residual life of construction elements in the gaseous hydrogen environment

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

The algorithm of long-term strength calculation of structural by the stage of the subcritical hydrogen – induced propagation in metals is proposed. The hydrogen – induced algorithm is based on the calculation model of the hydrogen – induced crack. On the basis of the power criterion of fracture the kinetic equations has been obtained, that allow to estimate the kinetics of distribution of hydrogen crack propagation depending on the loading parameters, geometrical crack sizes and physical and chemical that strength, characteristics of the material, residual life time, of structural elements operating in hydrogen, admissible sizes of the revealed defects from the point of view their hydrogen fracture and given life time revealed.