

ПОШИРЕННЯ КОРОЗІЙНИХ ТРІЩИН В ДВОШАРОВИХ ПЛАСТИНАХ ЗА ДОВГОТРИВАЛОГО НАВАНТАЖЕННЯ

О.Є. Андрейків¹, І.Я. Долінська², А.Р. Лисик¹

¹Львівський національний університет ім. Івана Франка, Україна;

²Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Україна.

The computational models were developed to determine the residual life of two-layer plates with cracks under long-term cyclic loads and corrosive environments. These models are based on the first law of thermodynamics, that is, the energy balance of the components and rates of their changes in a two-layer metal body that contains the macro crack and exposed to long-term cyclic tension and corrosion aggressive environments. The particular cases are considered.

Вступ. Як відомо [1, 2], корозійне середовище посилює руйнування металевих матеріалів за довготривалого статичного чи циклічного навантажень і викликає поширення корозійно-механічних тріщин. Для визначення їх ресурсу (залишкового ресурсу) необхідно мати відповідні розрахункові моделі. Сьогодні більшість із них побудовані на основі опису тільки конкретних експериментальних даних. На основі цих теорій можна визначати ресурс (залишковий) тільки деяких елементів конструкцій з тих матеріалів, на експериментальних даних яких вони побудовані. В праці [3] розроблена розрахункова модель на основі деформаційного підходу і деяких припущень стосовно корозійних процесів у вершині тріщини, що також обмежує діапазон її коректного застосування.

Проблема ускладнюється, коли елементи конструкцій мають біметалеву будову, тобто двошарові. Це часто зустрічається в енергетичній і хімічній промисловості. В цьому випадку ще недостатньо розроблені методи для визначення довготривалої міцності біметалів і довговічності виробів із них, особливо, коли вони послаблені дефектами типу тріщин і піддані дії довготривалого циклічного навантаження. Такі матеріали відносяться до класу неоднорідних, для яких характеристики пластичності і тріщиностійкості не стали за об'ємом, а кінетика поширення тріщини складніша, ніж для ізотропних матеріалів. У зв'язку з цим контур наскрізної корозійної тріщини в біметалевій пластині не буде прямолінійний, що ускладнює визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень навіть у найпростіших випадках. Тому, в даній праці побудовано розрахункову модель для знаходження ресурсу елементів конструкцій з тріщинами за корозійного середовища і довготривалого циклічного навантаження, застосування якої апробовано на задачах для двошарових пластин.

Математична модель. Використовуючи раніше отримані результати [4, 5], побудуємо розрахункову модель для визначення періоду докритичного росту тріщини в двошаровій пластині. Для цього розглянемо двошарову (приблизно з однаковими модулями пружності шарів) пластину (товщини шарів h_1, h_2 , $h = h_1 + h_2$) з наскрізною початковою прямолінійною тріщиною довжини $2l_0$, яка розтягується у корозійному середовищі циклічними зусиллями з амплітудою p , які викликають в пластині симетричний щодо площини розміщення тріщини напружено-деформований стан (рис. 1а). Задача полягає у визначенні кількості циклів навантаження $N = N_*$ з досягненням яких корозійно-втомна тріщина підросте до критичного розміру $l = l_*$ і пластина зруйнується.

Для реалізації даної задачі побудуємо математичну модель, тобто диференціальні рівняння з початковими і кінцевими умовами опису таких процесів. На основі відомих

результатів праць [5, 6] для дослідження кінетики росту корозійно-втомної тріщини і визначення періоду її докритичного росту $N = N_*$ можемо записати наступне рівняння з відповідними початковими і кінцевими умовами:

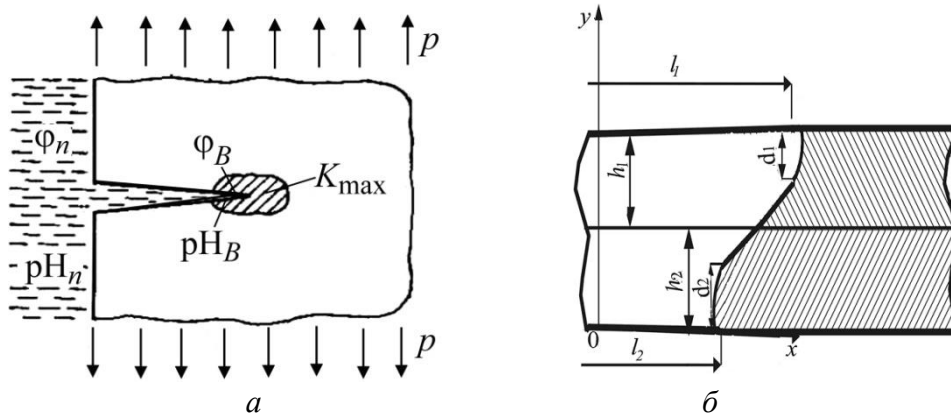


Рис. 1. Схеми навантаження (а) і поперечного перерізу (б) двошарової пластини з тріщиною.

$$\frac{\partial y}{\partial N} \sqrt{1 + (\partial x / \partial y)^2} = \beta_i \{ (1 - R)^4 [K_{I \max}^2(x, y) - K_{isc}^2] \}^2 + \eta_i [K_{I \max}^2(x, y) - K_{isc}^2] \times [K_{ifc}^2 - K_{I \max}^2(x, y)]^{-1}, \quad (1)$$

$$N = 0, x = f(0, y); N = N_*, x = x_* = f(N_*, y_*); K_I(x_*, y_*) = K_{ifc} \quad (i = 1; 2). \quad (2)$$

Тут $\beta_i, \eta_i, K_{isc}^2, K_{ifc}^2$ – характеристики кінетичної діаграми поширення корозійно-втомної тріщини в матеріалі, які визначають для кожного i -го шару пластини експериментально [6]; $K_{I \max}(x, y)$ – змінне максимальне значення коефіцієнта інтенсивності напружень вздовж контуру тріщини. Згідно рис. 1б вважається, що швидкість $V(x, y)$ поширення корозійно-втомної тріщини в шарі з товщиною h_1 буде більша, ніж у шарі товщиною h_2 .

Диференціальне рівняння в часткових похідних (1) нелінійне, розв'язок якого пов'язаний зі значними математичними труднощами. Для його спрощення чинимо так. Вважаємо, що конфігурація рухомого контуру тріщини за товщиною пластини наближено прямолінійна і тільки за виходу на поверхні має заокруглення, де $(\partial x / \partial y)_{y=0; h} = 0$. Тоді кінетику поширення корозійно-втомної тріщини визначатимуть її розміри на поверхнях пластини $l_1 = l_1(N), l_2 = l_2(N)$. На основі цього рівняння (1) зведемо наближено до системи звичайних диференціальних рівнянь з відповідними початковими і кінцевими умовами:

$$\frac{dl_i}{dN} = \beta_i \{ (1 - R)^4 [K_{I \max}^2(l_i, y_i) - K_{isc}^2] \}^2 + \eta_i [K_{I \max}^2(x, y) - K_{isc}^2] \times [K_{ifc}^2 - K_{I \max}^2(x, y)]^{-1},$$

$$(y_1 = h, y_2 = 0) N = 0, l_i = l_{i0}; N = N_*, l_i = l_{i*}; K_I(l_{i*}) = K_{ifc}. \quad (3)$$

Тут коефіцієнти інтенсивності напружень біля контуру тріщини $K_I(l_i, y_i)$, на основі отриманих раніше результатів праці [6], визначатимемо за формулою

$$K_I[l_2 + \beta(l_1 - l_2), y] = p \sqrt{\pi l_2} K(\alpha, \varepsilon, \beta, \gamma), \quad (4)$$

$$K(\alpha, \varepsilon, \beta, \gamma) = [\varepsilon + \alpha(1 - \varepsilon)](1 - \beta) + \beta \varepsilon^{-0.5} [\varepsilon + \gamma(1 - \varepsilon)],$$

де $\varepsilon = l_2 l_1^{-1}, \alpha = d_1^{-1} h, \beta = y h^{-1}, \gamma = l_1^{-1} h$.

Таким чином період докритичного росту $N = N_*$ тріщини (залишковий ресурс пластини) можемо визначити розв'язавши математичну задачу (3), (4).

Заразом пропонуємо простіший підхід для реалізації математичної задачі (3), (4) [6], суть якого наступна. Контур тріщини за товщиною двошарової пластини вважатимемо прямолінійно косим. Тоді різницю між значеннями поверхневих довжин тріщини можна

визначити так: $\Delta l = l_1 - l_2 = h \operatorname{ctg} \theta$ ($0,5\pi \geq \theta \geq \theta_*$, де θ – кут між віссю Ox і напрямком поширення тріщини; θ_* відповідає випадковій спонтанного поширення тріщини [6]). Далі для спрощення задачі вважатимемо, що в процесі поширення тріщини різниця між поверхневими значеннями довжин тріщини Δl буде змінюватися від нуля до $h \operatorname{ctg} \theta_*$ і її можна подати наближено степеневою залежністю від l_1 , тобто

$$\Delta l \approx h(l_1^n - l_0^n)(l_{1*}^n - l_0^n)^{-1} \operatorname{ctg} \theta_* . \quad (5)$$

Тут показник степеня n залежить від характеристик матеріалів шарів пластини і його треба визначати експериментально, або порівняно з одним точним значенням за розв'язання системи рівнянь (3). Тоді на основі (5) і сказаного вище для визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень в поверхневих точках контуру тріщини отримуємо формули

$$K_{2I}(l_2, 0) \approx p \sqrt{\pi(l_1 - \Delta l)} \left[h d_2^{-1} + l_1^{-1} (l_1 - \Delta l) (1 - h d_2^{-1}) \right] (l_0 \leq l_1 < l_{1*}),$$

$$K_{II}(l_1, h) \approx p \sqrt{\pi l_1} \left[\frac{h}{l_1} + \frac{(l_1 - \Delta l)(l_1 - h)}{l_1^2} \right] (l_0 \leq l_1 < l_{1*}) . \quad (6)$$

Коефіцієнти інтенсивності напружень, які наближено визначаються за формулами (6), залежать тільки від однієї змінної $l_1(N)$. Для визначення цієї величини достатньо тільки одного першого рівняння (3), що значно спрощує розв'язок задачі з визначення періоду докритичного росту тріщини $N = N_*$.

Тоді, на основі вище поданого, визначення періоду $N = N_*$ докритичного росту корозійно-втомної тріщини спроститься і зведеться до математичної задачі:

$$\frac{dl_1}{dN} = \beta_1 \{ (1 - R)^4 [K_{II}^2(l_1) - K_{Isc}^2] \} + \eta_1 [K_{II}^2(l_1) - K_{Isc}^2] [K_{Ifc}^2 - K_{II}^2(l_1)]^{-1}, \quad (7)$$

$$(y_1 = h, y_2 = 0), \quad l_1(0) = l_0, \quad l_1(N_*) = l_{1*}, \quad K_{II}(l_{1*}) = K_{Ifc},$$

де $K_{II}(l_1)$ визначають за другою формулою (6).

Оцінка залишкового ресурсу. Для доведення розв'язку задачі до числових результатів покладемо, що шар товщиною h_1 , виготовлений зі сталі 08X18H12T [2], а шар товщиною h_2 – зі сталі 12X1МФА [2]. Вибір матеріалів шарів пластини пов'язаний тільки з тим, що для цих матеріалів у літературі відомі експериментальні дані, на основі яких можна визначити характеристики кінетичної діаграми поширення корозійно-втомної тріщини, зокрема для сталі 08X18H12T [2]: $K_{Ifc} = 70 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$, $\beta_1 = 3,6 \cdot 10^{-9}$, $\eta_1 = 1068$, $K_{Isc} = 11 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$, $h_1 = 0,002 \text{ м}$, $d_1 = 0,001 \text{ м}$, $p = 250 \text{ МПа}$; для сталі 12X1МФ геометричні параметри і механічні характеристики будуть [2]: $\beta_2 = 3,2 \cdot 10^{-9}$, $\eta_2 = 925$, $h_2 = 0,002 \text{ м}$, $d_2 = 0,001 \text{ м}$, $K_{2fc} = 80 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$, $K_{2sc} = 15 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$. Тоді, підставляючи ці дані у співвідношення (3) і (4), для визначення періоду $N = N_*$ докритичного росту тріщини в двошаровій пластині отримуємо систему диференціальних рівнянь

$$\frac{dl_1}{dN} = \frac{5,6 \cdot 10^{-13} \cdot [(1,9 \cdot 10^5 l_1 F_1^2(l_1, l_2) - 121)^2 + 2,1 \cdot 10^8 l_1 F_1^2(l_1, l_2) - 129228]}{1 - 30,7 l_1 F_1^2(l_1, l_2)}$$

$$\frac{dl_2}{dN} = \frac{6,5 \cdot 10^{-13} \cdot [(1,9 \cdot 10^5 l_2 F_2^2(l_1, l_2) - 225)^2 + 1,8 \cdot 10^8 l_2 F_2^2(l_1, l_2) - 208125]}{1 - 40,1 l_2 F_2^2(l_1, l_2)}, \quad (8)$$

$$F_1(l_1, l_2) = l_2 l_1^{-1} + 0,004(1 - l_2 l_1^{-1}) l_1^{-1}; \quad F_2(l_1, l_2) = 4 - 3 l_2 l_1^{-1}.$$

Її розв'язували числовим методом Рунге-Куты, при цьому вважали, що початкові розміри тріщини на поверхні пластини однакові, тобто $l_{10} = l_{20} = l_0$, а критичний розмір тріщини визначали з критерію Ірвіна [6]. У результаті на рис. 2 побудовано графічну залежність залишкової довговічності N_* двошарової пластини від початкової довжини

тріщини l_0 (крива 1). Разом з тим на даному рисунку зображені графічні залежності довговічності пластини з прямолінійною тріщиною (аналог задачі Гріффітса за циклічного розтягу і корозійного середовища) від початкового розміру дефекту, коли пластина виготовлена тільки зі сталі 08X18H12T [2] (крива 3) або зі сталі 12X1МФА [2] (крива 2). Поряд з цим дана задача розв'язана наближено шляхом реалізації рівняння (7), яке для даного конкретного випадку набуде вигляду:

$$\frac{dl_1}{dN} = \frac{5,6 \cdot 10^{-13} \cdot [(1,9 \cdot 10^5 l_1 F_3^2(l_1, \Delta) - 11^2)^2 + 2,1 \cdot 10^8 l_1 F_3^2(l_1, \Delta) - 129228]}{1 - 30,7 l_1 F_3^2(l_1, \Delta)}, \quad (9)$$

$$l_1(0) = l_0, \quad l_1(t_*) = l_{1*}, \quad K_{II}(l_{1*}) = K_{IIc}.$$

$$F_3(l_1, \Delta) = 4 \cdot 10^{-3} l_1^{-1} + (l_1 - \Delta)(l_1 - 4 \cdot 10^{-3}) l_1^{-2}; \quad \Delta = 0,0011(l_1^{2,7} - l_0^{2,7})(0,026^{2,7} - l_0^{2,7})^{-1}.$$

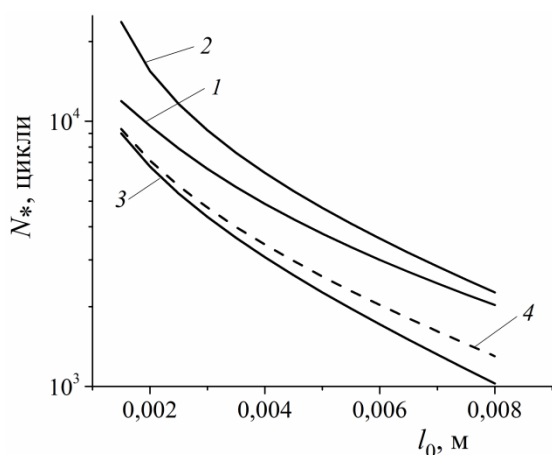


Рис. 2. Залежність $N_* \sim l_0$ для двошарової пластини (крива 1 і 4), для пластин зі сталі 12X1МФА (крива 2) та 08X18H12T (крива 3).

Інтегрування в рівнянні (9) проведено чисельно, на основі чого на рис. 2 побудована залежність періоду $N = N_*$ докритичного росту корозійно-втомної тріщини в двошаровій пластині (крива 4) від початкового розміру тріщини l_0 . Порівняння кривих на рис. 2 підтверджує правильність запропонованої моделі для визначення довговічності двошарової пластини за системою рівнянь (3), а також запропонованого наближеного підходу, внаслідок чого знаходження періоду докритичного росту корозійно-втомної тріщини звелось до простішої проти (8) математичної задачі (9).

Висновки. На основі енергетичного підходу побудована розрахункова модель, для визначення залишкової довговічності двошарових металевих пластин із тріщинами за циклічного розтягу і дії

корозійно агресивних середовищ. На основі цього розраховано залишковий ресурс пластини, в якій один шар виготовлений із низьколегованої сталі, а другий – з аустенітної. Як показують результати розрахунків, довговічність пластини суттєво залежить від початкового розміру дефекту і корозійної стійкості її складових.

1. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О.Н. Романив, С.Я. Ярема, Г.Н. Никифорчин, Н.А. Махутов, М.М. Стадник. – К.: Наук. думка, 1990. – 660 с.
2. Дмитрах І.М. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень / І.М. Дмитрах, В.В. Панасюк. – Львів: ФМІ НАН України, 1999. – 340 с.
3. Андрейків О.Є. Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах / О.Є. Андрейків, О.В. Гембара. – К.: Наук. думка, 2008. – 344 с.
4. Сакара А. Математичне моделювання процесів руйнування металевих матеріалів за механічного навантаження та дії водневих і корозійних середовищ / А. Сакара, Ю. Банахевич, І. Лохман / Спец. вип. журн. Фіз.-хім. механіка матеріалів. Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів. – 2010. – № 8. – С. 120–124.
5. Попович П. Вплив експлуатаційних середовищ на поширення поверхневих корозійно-втомних тріщин в елементах конструкцій сільськогосподарських машин / П. Попович, О. Цьонь, Т. Довбуш // Вісник ТНТУ. – 2014. – № 3(75). – С. 157–166.
6. Андрейків О.Є. Визначення залишкового ресурсу двошарових пластин з системами тріщин за дії довготривалого статичного навантаження і високої температури / О.Є. Андрейків, І.Я. Долінська, А.Р. Лисик // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – № 4. – С. 21–29.