

УДК 539.375; 620.191.33:620.193

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ТОРСІОНА ЗА ВПЛИВУ КОРОЗИВНОГО СЕРЕДОВИЩА

О. Є. АНДРЕЙКІВ¹, І. Я. ДОЛІНСЬКА², С. В. НАСТАСЯК¹, М. С. ШЕФЕР²

¹ Львівський національний університет ім. Івана Франка;

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

Розроблено розрахункову модель для визначення залишкового ресурсу торсіона (циліндра) за довготривалого закруту в умовах дії корозивного середовища. В основу моделі покладено побудоване диференціальне рівняння кінетики поширення корозійно-механічної тріщини від початкового до граничного її розміру. Оцінено залишковий ресурс торсіона зі сталі 45ХН2МФА з півеліптичною тріщиною, площина якої напрямлена під кутом 45° до його осі за дії довготривалого закруту.

Ключові слова: торсіон, залишковий ресурс, корозійно-механічна тріщина, корозивне середовище, розрахункова модель.

Calculation model for determination of the torsion bar (cylinder) liferesidual resource under long-term twist under corrosion environment effect has been developed. The model is based on the constructed differential equation of the kinetics of corrosion-mechanical crack propagation from its initial to its ultimate size. The residual life of the torsion bar made of 45ХН2МФА steel with a semi-elliptical crack, the plane of which is directed at an angle of 45° to torsion bar axis under the action of long-term turning has been estimated.

Keywords: torsion, residual resource, corrosion-mechanical crack, corrosion environment, calculation model.

Вступ. Як відомо [1–5], корозивне середовище посилює руйнування металевих матеріалів за довготривалого статичного навантаження і сприяє поширенню корозійно-механічних тріщин. Для визначення періоду докритичного росту таких тріщин (залишкового ресурсу) в металевих елементах конструкцій необхідні відповідні розрахункові моделі. Більшість із відомих [1–5] ґрунтуються на описі тільки конкретних експериментальних результатів. На основі цих теорій можна визначати залишковий ресурс лише деяких елементів конструкцій із тих матеріалів, на яких експериментували.

Нижче на основі раніше розробленого [6] енергетичного підходу, а також законів фізичної хімії побудовано розрахункову модель (диференціальне рівняння з початковою і кінцевою умовами) для визначення періоду докритичного росту тріщин в елементах конструкцій за дії довготривалого навантаження і корозивного середовища.

Формулювання задачі та метод її розв'язання. Розглянемо циліндр (торсіон) зі сталі 45ХН2МФА (відпуск 470 К), який підданий довготривалому закруту моментом M і послаблений у найнапруженішому (нормальні напруження) перерізі під кутом 45° до його осі півеліптичною тріщиною початкової глибини $d = d_0$ (рис. 1), де величина d визначає найглибшу точку контуру тріщини і водночас найменшу піввісь еліпса. Вважають, що в таку тріщину проникає корозивне середовище, яке зумовлює її корозійно-механічне поширення. Задача полягає

Контактна особа: О. Є. АНДРЕЙКІВ, e-mail: andreykiv@ipm.lviv.ua

у визначенні часу $t = t_*$, за який в результаті дії закруту і корозивного середовища тріщина досягне критичної глибини $d = d_*$ і циліндр зруйнується.

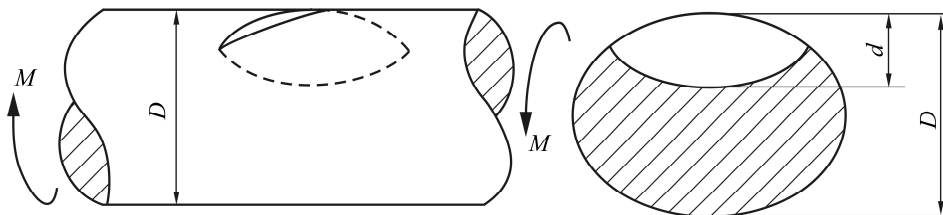


Рис. 1. Силовa схема закруту циліндра (торсіона) зі зовнішньою півеліптичною тріщиною.

Fig. 1. Power scheme of turning of the cylinder (torsion bar) with an external semi-elliptical crack.

Розв'яжемо задачу на основі сформульованої нижче розрахункової моделі визначення періоду докритичного росту плоскої корозійно-механічної тріщини, суть якої така.

На основі результатів праці [6] енергетичний баланс для елементарного стрибка росту тріщини запишемо так:

$$A = W + \Gamma, \quad (1)$$

де A – робота зовнішніх сил, яку вважаємо сталою; W – енергія деформування тіла, яку подамо у вигляді

$$W = W_e + W_p(S), \quad (2)$$

W_e – пружна складова W ; $W_p(S)$ – частина енергії пластичного деформування, яка залежить від площі тріщини S ; Γ – енергія руйнування металевого матеріалу елемента конструкції, яка залежить від площі тріщини, часу і корозивного середовища. Оскільки виконується рівняння енергетичного балансу (1), то виконуватиметься рівняння балансу швидкостей зміни енергії, тобто

$$dA/dt = dW/dt + d\Gamma/dt. \quad (3)$$

Підставляючи вираз (2) в (3) з урахуванням, що $dA/dt = 0$, отримаємо:

$$\frac{\partial}{\partial S} \left[\Gamma - (A - W_e - W_p) \right] \frac{dS}{dt} + \left[\frac{d\Gamma}{dt} \right]_{t=\Delta t_c} = 0, \quad (4)$$

де $t = \Delta t_c$ – час стрибка тріщини; згідно з працею [6], $\frac{\partial}{\partial S} \left[\Gamma - (A - W_e - W_p) \right] = \gamma_C - \gamma_t$, γ_t – усереднене значення роботи пластичних деформацій у зоні передруйнування (вузька смуга біля контуру тріщини шириною $b_p(\xi)$), ξ – біжуча координата вздовж контуру тріщини); γ_C – її критичне значення.

З рівності (4) знайдемо швидкість поширення корозійної тріщини:

$$V = \frac{dS}{dt} = - \left[\frac{d\Gamma}{dt} \right]_{t=\Delta t_c} / (\gamma_C - \gamma_t). \quad (5)$$

Для визначення періоду докритичного росту тріщини до рівняння (5) додамо початкову і кінцеву умови:

$$t = 0, \quad S(0) = S_0, \quad t = t_*, \quad S(t_*) = S_*, \quad \gamma_t(S_*) = \gamma_C, \quad (6)$$

де S_0 , S_* – початкова і гранична площа тріщини, відповідно.

На основі результатів [6]

$$\gamma_C \approx \sigma_t \delta_{CC}, \quad \gamma_t \approx \frac{\sigma_t}{\Delta S_t} \int_L \delta_t(\xi, 0) b_p(\xi) d\xi, \quad b_p(\xi) \approx \beta \delta_t(\xi, 0), \quad (7)$$

де δ_t – розкриття у вершині тріщини; δ_{CC} – його критичне значення за корозійного руйнування; σ_t – усереднені нормальні напруження в зоні передруйнування; L – контур тріщини; ΔS_t – площа зони передруйнування; β – константа, яку визначають із експерименту.

Вважаючи, що зона передруйнування є вузькою смугою біля контуру тріщини, її площу можна наближено визначити так:

$$\Delta S_t \approx \beta \int_L \delta_t(\xi) d\xi. \quad (8)$$

На основі результатів [7] площу елементарного стрибка ΔS_C тріщини подамо як суму елементарного поширення тріщини S_a внаслідок анодного розчинення і механічного стрибка S_m , спричиненого механічним навантаженням і наводненням за електрохімічної корозії, тобто

$$\Delta S_C = S_a + S_m. \quad (9)$$

Використовуючи (8) і результати [8], величини S_m , S_a , δ_{CC} запишемо у вигляді

$$S_m = \alpha_0 \int_L [\delta_t(\xi, 0) - \xi_0] d\xi, \quad S_a = \alpha_0 F m^{-1} n^{-1} \int_L \delta_t(\xi, 0) \int_0^{\Delta t} i(t) dt d\xi, \\ \delta_{CC} = \delta_C - A_1 C_H(\Delta t). \quad (10)$$

Тут F – число Фарадея; m – грам-еквівалентна вага металу; n – валентність металу; ξ_0 , α_0 , A_1 – константи, які визначають із експерименту [6]; $i(t)$ – густина анодного струму на поверхні вершини тріщини; δ_C – критичне значення δ_t без корозії; $C_H(\Delta t)$ – концентрація водню в зоні передруйнування.

Розглядаємо випадок, коли швидкість анодного розчинення набагато менша від швидкості механічного росту тріщини. Тоді, на основі результатів [7] і співвідношень (7), (8), (10), енергію руйнування $\Gamma(t)$ можемо подати наближено так:

$$\Gamma(t) = \sigma_t \alpha_0 \int_L [\delta_t(\xi, 0) - \xi_0] [\delta_C - A_1 C_H(t)] d\xi. \quad (11)$$

Згідно з результатами [6, 7], зміну концентрації водню $C_H(\Delta t)$ з часом у зоні передруйнування для відносно великих часів можна подати так:

$$C_H(\Delta t) \approx B \Delta t_C i_{\max}, \quad (12)$$

де B – константа системи метал–середовище, яку визначають із експерименту.

Щоб визначити час Δt_C – інкубаційний період підготовки елементарного стрибка корозійної тріщини, вважаємо, що тріщина почне поширюватися, коли максимальне розкриття в зоні передруйнування $\delta_t(\xi, 0, C_H)$ досягне критичного значення δ_{CC} . Таким чином, на основі співвідношень (10), (12) отримаємо рівняння:

$$\delta_C - \delta_t(\xi, 0) = A_1 B \Delta t_C i_{\max}. \quad (13)$$

Розв'язок рівняння (13) стосовно Δt_C такий:

$$\Delta t_C = i_{\max}^{-1} (A_1 B)^{-1} [\delta_C - \delta_t(\xi, 0)]. \quad (14)$$

Оскільки значення стрибка тріщини площі ΔS_C достатньо мале, то, очевидно, на такій малій віддалі від вершини тріщини розкриття $\delta_t(\xi, x)$ змінюється не-

значно і його наближено по x (x – біжуча координата в зоні передруйнування по нормалі до контуру тріщини L) можна вважати константою, тобто $\delta_t(\xi, x) \approx \delta_t(\xi, 0)$ ($0 \leq x \leq b_p^*$, b_p^* – критичне значення b_p). Тоді на основі (11), (12) і (14), а також результатів праць [6], отримуємо:

$$d\Gamma(t)/dt|_{t=\Delta t_C} = -\alpha_1 \sigma_t \int_L [\delta_t(\xi, 0) - \xi_0] d\xi, \quad (15)$$

де α_1 – характеристика матеріалу, яку визначають із експерименту.

Підставляючи співвідношення (7), (8) і (15) в рівняння (5) і враховуючи результати [6], для визначення періоду $t = t_*$ докритичного росту корозійної тріщини одержимо рівняння

$$V = \frac{dS}{dt} = \alpha_1 \frac{\int_L [\delta_t(\xi, 0) - \xi_0] d\xi}{\delta_{CC} - \left| \int_L \delta_t(\xi, 0) d\xi \right|^{-1} \int_L \delta_t^2(\xi, 0) d\xi}, \quad (16)$$

з початковою і кінцевою умовами

$$t = 0, \quad S(0) = S_0, \quad t = t_*, \quad S(t_*) = S_*, \quad \delta_t(S_*) = \delta_C. \quad (17)$$

Як випливає з рівняння (16), для $\xi_0 = \delta_{SCC}$ швидкість корозійно-механічної тріщини дорівнює нулю, а для $\delta_t < \delta_{SCC}$ – від'ємна. Це означає, що для $\delta_t < \delta_{SCC}$ тріщина не поширюватиметься, тобто δ_{SCC} є нижнім пороговим значенням на кінетичній діаграмі поширення корозійно-механічної тріщини.

Розрахунок залишкового ресурсу торсіона. Застосуємо модель (16), (17) для розрахунку залишкового ресурсу торсіона зі сталі 45ХН2МФА (рис. 1) радіуса $R = 50$ mm, який підданий довготривалому закруту моментом $M = 1,4$ kN·m в умовах дії дистильованої води. На основі результатів праці [8] і рівняння (16) побудована (рис. 2) кінетична діаграма $V \sim \delta_t$ для сталі 45ХН2МФА (відпуск 470 К) у дистильованій воді. Як бачимо, експериментальні результати практично збігаються з розрахунком (16) (суцільна лінія), що добре підтверджує коректність моделі (16), (17). При цьому для отриманої кінетичної діаграми знайдено характеристики матеріалу: $\alpha_1 = 8,2 \cdot 10^{-8}$ m/s, $\delta_{CC} = 7,5 \cdot 10^{-6}$ m, $\delta_{SCC} = 2,4 \cdot 10^{-7}$ m. Розкриття δ_t тріщини в її центральній частині визначали наближено за відомою [9] формулою

$$\delta_t(R, d) = K_I^2 \sigma_t^{-1} E^{-1} (1 - \nu^2) (1 - \lambda^2)^{-0,25}, \quad (18)$$

де E – модуль пружності; ν – коефіцієнт Пуассона; λ – відносний локальний рівень навантаження торсіона $\lambda = \sigma/\sigma_t$; σ , σ_t – усереднені регулярне та пластичні напруження в зоні передруйнування біля контуру тріщини, відповідно; K_I – коефіцієнт інтенсивності напружень. Як і в праці [10], K_I шукаємо методом граничної інтерполяції, в результаті чого отримуємо такі наближені формули:

$$K_I = \frac{0,04 M f(\epsilon)}{R^2 \sqrt{R}}, \quad f(\epsilon) = \frac{1,9887 \sqrt{0,16 + 0,84\epsilon} [\varphi(\epsilon) - 0,84\epsilon + 0,34]}{g(\epsilon) \sqrt{\frac{0,7494(0,16 + 0,84\epsilon)[\varphi(\epsilon) - 0,84\epsilon + 0,34]^2}{(1 - \epsilon)[0,2142\varphi(\epsilon) + 0,1037 - 0,2108\epsilon]^2} + 1}}, \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \varphi(\varepsilon) &= 2,6667(0,1344 - 0,5712\varepsilon - 0,7056\varepsilon^2)^{3/2} \left[\arccos(1,68\varepsilon - 0,68) - \right. \\ &\quad \left. - 2(1,68\varepsilon - 0,68)\sqrt{0,1344 - 0,5712\varepsilon - 0,7056\varepsilon^2} \right]^{-1}, \\ g(\varepsilon) &= 0,0156 \arccos(1,68\varepsilon - 0,68) - 0,0313(1,68\varepsilon - 0,68) \times \\ &\times \sqrt{0,1344 - 0,5712\varepsilon - 0,7056\varepsilon^2} \times (-0,0752 - 4,5696\varepsilon + 5,6448\varepsilon^2) - \\ &\quad \frac{3,5556(0,1344 - 0,5712\varepsilon - 0,7056\varepsilon^2)^3}{2 \arccos(1,68\varepsilon - 0,68) - 4(1,68\varepsilon - 0,68)\sqrt{0,1344 - 0,5712\varepsilon - 0,7056\varepsilon^2}}. \end{aligned}$$

Підставляючи (19) в (18), для визначення δ_t отримаємо наближену формулу

$$\delta_t(R, d) \approx \frac{1,23 \cdot 10^{-2} f^2(\varepsilon) \cdot M^2 (1 - \nu^2)}{\sigma_t E D^5 (1 - \lambda^2)^{0,25}}. \quad (20)$$

Вважаємо, що за час $t = t_*$ безрозмірна глибина тріщини $\varepsilon = d/D$ зміниться із $\varepsilon_0 = d_0/D$ до $\varepsilon_* = d_*/D$. Цей час і визначатиме залишковий ресурс торсіона. Підставивши співвідношення (20) в рівняння (16) і розв'язавши його за умов (17), отримали формулу для визначення залишкового ресурсу торсіона

$$\begin{aligned} t_* &= \frac{D}{\alpha_1} \times \\ &\times \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_*} \left[\delta_{CC} - \frac{0,0123 f^2(\varepsilon) \cdot M^2 (1 - \nu^2)}{\sigma_t E D^5 (1 - \lambda^2)^{0,25}} \right] \cdot \left[\frac{0,0123 f^2(\varepsilon) \cdot M^2 (1 - \nu^2)}{\sigma_t E D^5 (1 - \lambda^2)^{0,25}} - \delta_{SCC} \right]^{-1} d\varepsilon. \end{aligned} \quad (21)$$

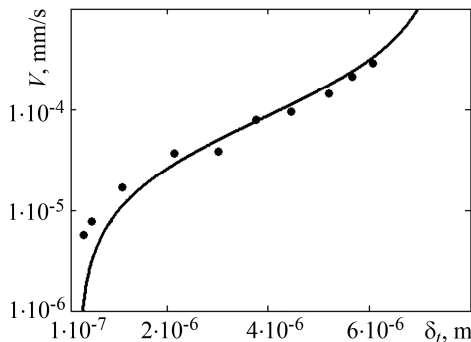


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Кінетична діаграма швидкості росту тріщини сталі 45ХН2МФА (відпуск 470 К) у дистильованій воді: ● – експеримент [8], суцільна лінія – розрахунок за формулою (16).

Fig. 2. Kinetic diagram of the crack growth rate of 45XH2MFA steel (tempering 470 K) in distilled water: ● – experiment [8], solid line – calculation by formula (16).

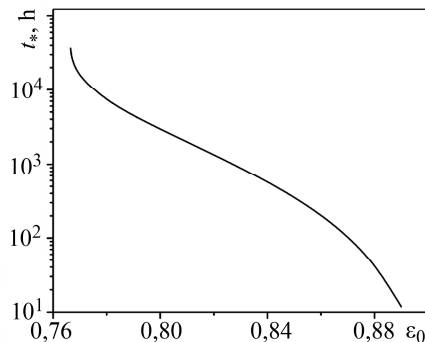


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Залежність залишкового ресурсу торсіона від безрозмірного значення початкової глибини тріщини.

Fig. 3. Dependence of the residual life of the torsion bar on the dimensionless value of the initial crack depth.

Підставляючи у формулу (21) числові значення розмірів торсіона і тріщини, крутного моменту M та характеристик матеріалу δ_{CC} , δ_{SCC} , α_1 , побудували (рис. 3) залежність залишкового ресурсу t_* торсіона для різних значень відносної

величини ϵ_0 початкової тріщини. Показано, що зі збільшенням початкової глибини тріщини залишковий ресурс торсіона різко зменшується.

ВИСНОВКИ

Сформульовано задачу і побудовано розрахункову модель для визначення періоду докритичного росту корозійно-механічних тріщин у елементах конструкцій. Модель побудовано в деформаційних параметрах розкриття тріщини біля її контуру, що дає змогу використовувати її для розрахунку елементів конструкцій з малими тріщинами. Тут її застосовано до визначення залишкового ресурсу торсіона зі сталі 45ХН2МФА, який підданий довготривалому закруту моментом M в умовах дії дистильованої води. Встановлено, що зі збільшенням початкової глибини тріщини залишковий ресурс торсіона інтенсивно зменшується.

1. *Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов* / О. Н. Романив, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин, Н. А. Махутов, М. М. Стадник // *Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пос. в 4-х т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка.* – К.: Наук. думка, 1990. – Т. 4. – 660 с.
2. *Черепанов Г. П.* Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
3. *Artois P.* Atomistic simulations of stress corrosion cracking // *Corr. Sci.* – 2010. – **52**. – P. 1247–1257.
4. *Дмитрах І. М., Панасюк В. В.* Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка, 1999. – 340 с.
5. *Sieradzki K. and Newman R. C.* Stress-corrosion cracking // *J. Phys. Chem. Solids.* – 1987. – **48**, № 11. – P. 101–1113.
6. *Андрейків О. Є., Долінська І. Я.* Визначення періоду докритичного росту малих плоских тріщин високотемпературної повзучості в елементах конструкцій // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2021. – **57**, № 2. – P. 16–23.
7. *Андрейків О. Є., Гембара О. В.* Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах. – К.: Наук. думка, 2008. – 346 с.
8. *Romaniv O. N., Nikiforchin G. N., Tsiurul'nik A. T.* Inhibitor protection of high-strength steels from corrosion cracking in the stage of crack propagation // *Soviet Materials Science.* – 1981. – **17**, № 1. – P. 42–49.
9. *Yadzhak N.* Generalization of the equivalent area method for the case of short fatigue cracks in a three-dimensional body // *Visnyk of the Lviv University. Ser. Mechanics and Mathematics.* – 2020. – № 89. – С. 134–141.
10. *Панько І. М.* Теоретичні основи інженерних методів для оцінки тріщиностійкості матеріалів і елементів конструкцій. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка, 2000. – 280 с.

Одержано 25.06.2021