

УДК 620.191.33:620.193

ОЦІНЮВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ТОНКОСТІННИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ З КОРОТКИМИ КОРОЗІЙНО-ВТОМНИМИ ТРІЩИНАМИ

О. Є. АНДРЕЙКІВ, А. Р. ЛИСИК, Н. С. ШТАЮРА, А. В. БАБІЙ

Львівський національний університет імені Івана Франка

На основі енергетичного підходу розроблена розрахункова модель для визначення через питомі енергетичні складові періоду докритичного росту коротких корозійно-втомних тріщин у пружно-пластичних пластинах під дією довготривалих циклічних навантажень і корозивних середовищ. Результати порівняні з відомими літературними даними.

Ключові слова: розрахункова модель, період докритичного росту коротких корозійно-втомних тріщин, енергетичний підхід, відносний рівень навантаження пластины, коефіцієнт інтенсивності напружень, розкриття у вершині тріщини.

За дії корозивного середовища і циклічного навантаження поширення тріщин значно посилюється [1–5]. Тривала експлуатація погіршує властивості металу, зокрема опір втомному росту тріщин [6]. Для визначення ресурсу, в тому числі залишкового, металевих елементів конструкцій за циклічного навантаження і дії корозивних середовищ необхідні відповідні розрахункові моделі. Більшість відомих моделей [1–3] побудовані тільки на основі конкретних експериментальних результатів. За ними можна визначити ресурс лише деяких елементів конструкцій із тих матеріалів, на експериментальних результатах яких вони побудовані. Особливо мало дослідженим є поширення коротких корозійно-втомних тріщин.

Найкоректніші дослідження коротких тріщин здійснені Річі [4] і Міллером [5]. При цьому в праці [5] весь період росту втомної тріщини розбито на три етапи за її розміром (мікроструктурно коротка, фізично мала і довга тріщини). Цю ідею використовували й інші дослідники [7–9]. При цьому запропоновано [10] для кожного етапу ввести свої порогові коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН). Багато інших авторів досліджували вплив різних чинників на кінетику поширення коротких тріщин, а саме: властивостей матеріалів [10], структури [11, 12], середніх напружень [13], градієнта напружень [14], середовища [15]. Статистичні аспекти поширення коротких тріщин розглядали в праці [16]. Широкий огляд результатів досліджень поширення коротких тріщин поданий в працях [17, 18].

Нижче зроблена спроба створити розрахункову модель за допомогою фундаментальнішого енергетичного підходу на основі першого закону термодинаміки для опису сповільненого руйнування металевих матеріалів в умовах дії циклічних навантажень, а також корозивно-агресивних середовищ.

Формулювання задачі та метод її розв'язку. Розглянемо випадок, коли пластина в умовах дії корозивно-агресивного середовища послаблена короткою початковою прямолінійною тріщиною довжини $2l_0$ і розтягується рівномірно розподіленими зусиллями p , які направлені перпендикулярно до лінії розміщення тріщини і змінюються з часом циклічно (рис. 1).

Задача полягає у визначенні такої кількості циклів навантаження $N = N_*$, за

Контактна особа: Н. С. ШТАЮРА, e-mail: shtajura_natalija@ukr.net

якої корозійно-втомна тріщина підрос- те до критичної величини $l = l_*$ і пласт- тина зруйнується.

Застосовуємо енергетичний підхід для побудови кінетичного рівняння поширення корозійно-втомної тріщини, в основу якого покладений перший закон термодинаміки за елементарного про- сування корозійно-втомної тріщини [19, 20]. При цьому будемо вважати, що середовище весь час потрапляє у вершину тріщини і там забезпечується постійна механіко-хімічна ситуація, тобто $\varphi_B = \text{const}$, $\text{pH}_B = \text{const}$. В іншому випадку для розв'язування сформуль- ованої задачі треба враховувати дифузію в середовищі іонів водню до поверхні вершини тріщини.

Виконуючи аналогічні дії, як і в названих вище працях, і вважаючи, що вод- неві механізми в корозійно-втомному руйнуванні є домінуючими, для визначен- ня величини $N = N_*$ отримаємо математичну модель:

$$V = \frac{dl}{dt} = \frac{\alpha(\delta_{t\max} - \delta_{scc})(1-R)^4(\delta_{t\max} + \delta_{scc}) + \eta}{\delta_{fcc} - \delta_{t\max}}, \quad (1)$$

$$N = 0, l(0) = l_0, N = N_*, l(N_*) = l_*; \delta_{t\max}(l_*) = \delta_{fcc}. \quad (2)$$

Тут $\delta_{t\max}$ – максимальні розкриття у вершині тріщини за цикл, а δ_{scc} , δ_{fcc} – їх від- повідно нижнє і верхнє порогові значення; R – коефіцієнт асиметрії в циклі; α , η – характеристики корозійно-втомного руйнування, які визначають із експе- рименту [19, 20].

Як видно із співвідношень (1), (2), для визначення $N = N_*$ необхідно вміти обчислити $\delta_{t\max}$. Для цього на основі методу еквівалентних напружених станів [21, 22] запропонована така наближена формула:

$$\delta_t \approx K_1^2 [E\sigma_t(1 - \xi^2)]^{-1}, \quad \xi^2 = p^2 / \sigma_t^2, \quad (3)$$

де E – модуль Юнга; σ_t – усереднені напруження в зоні передруйнування біля вершини тріщини; K_1 – КІН. Добра точність формули (3) підтверджена результа- тами порівняння з відомими літературними даними [22].

Для макротріщин, коли виконуються положення лінійної механіки руйну- вання, математичну модель (1), (2) поширення корозійно-втомних тріщин можна записати через коефіцієнти інтенсивності напружень $K_{I\max}$ у такому вигляді [21]:

$$V = \frac{dl}{dN} = \frac{\alpha(K_{I\max}^2 - K_{scc}^2)(1-R)^4(K_{I\max}^2 + K_{scc}^2) + \eta E \sigma_t}{E \sigma_t (K_{fcc}^2 - K_{I\max}^2)}, \quad (4)$$

$$N = 0, l(0) = l_0, N = N_*, l(N_*) = l_*; K_{I\max}(l_*) = K_{fcc}.$$

Тут K_{fcc} – критичне значення КІН за корозійно-циклічного навантаження; K_{scc} – нижнє порогове значення $K_{I\max}$.

Вважали [21], що математична модель поширення корозійно-втомних трі- щин (4) коректна для таких розмірів тріщин, для яких виконуються умови авто-

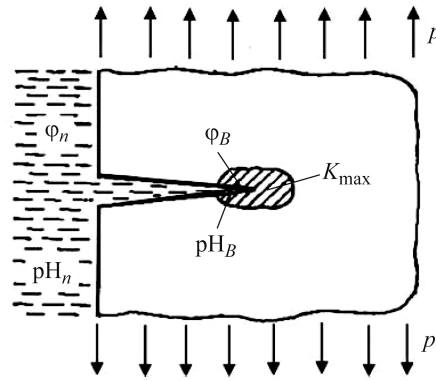


Рис. 1. Навантаження пластини з прямолінійною тріщиною в корозивному середовищі.

Fig. 1. Loading of a plate with a rectilinear crack in corrosive environment.

модельності за статичних навантажень. Однак, як показали результати експериментальних досліджень [4, 5, 7–18], для втомних тріщин повинні бути інші умови автотомельності. Це також видно і з формули (3), якщо вважати, що величина δ_r розкриття у вершині тріщини є інваріантною характеристикою втомного руйнування. Звідти випливає, що розкриття у вершині тріщини залежить не тільки від КІН, але й від навантаження пластини ξ .

Для зрозумілішого викладення проблеми коротких тріщин виконаємо числовий експеримент, використовуючи експериментальні результати праць [23, 24], де побудована кінетична діаграма поширення корозійно-втомної тріщини в пластині із сталі X70 в ґрунтовому середовищі. Можна вважати, що експериментували на макротріщинах, оскільки їх довжина l змінювалася в межах $11 < l < 19$ mm. За цими результатами за допомогою методу найменших квадратів у співвідношеннях (1) і (3) знайдені такі характеристики

$$\alpha \approx 0,3 \text{ cycle}^{-1}, \eta \approx 10^{-5} \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}, \delta_{scc} \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ mm}, \delta_{fcc} \approx 0,08 \text{ mm}, R = 0,1,$$

$$E \approx 2 \cdot 10^5 \text{ MPa}, \sigma_t = 636 \text{ MPa}, K_{fcc} = 101 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}, K_{scc} = 9 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}. \quad (5)$$

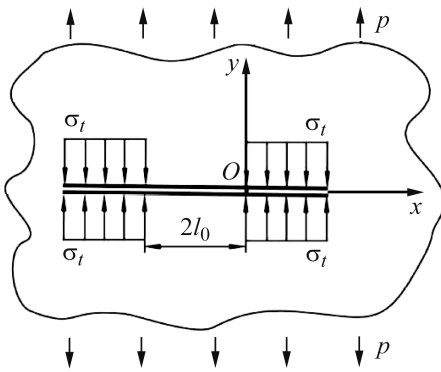


Рис. 2. Силова схема задачі Гріффітса.

Fig. 2. Loading scheme of the Griffiths problem.

фітса знаходимо [2] за формулою

$$K_I = p \sqrt{\pi l}. \quad (6)$$

Змінюючи покроково для кожного значення циклічного навантаження довжину тріщини l , визначаємо за формулою (6) КІН, а на основі співвідношень (1), (3) – швидкість поширення тріщини V . Маючи отримані значення K_I і V , будемо кінетичні діаграми $V-K_I$ поширення корозійно-втомної тріщини для кожного значення циклічного навантаження (рис. 3а).

Як бачимо (рис. 3а), для одного значення КІН може бути декілька значень V швидкості поширення корозійно-втомної тріщини в діапазоні коротких тріщин. Це означає, що КІН не може бути інваріантною характеристикою для опису корозійно-втомного поширення коротких тріщин, хоча довжина їх задовольняє умови автотомельності за статичного навантаження. Водночас за отриманими результатами числового експерименту побудована кінетична діаграма поширення корозійно-втомних тріщин в координатах $V-\delta_r$ (рис. 3б). На ній усі результати лягли на одну криву, яка описується залежністю (1). Це свідчить, що величина δ_r розкриття у вершині тріщини є інваріантною характеристикою поширення корозійно-втомних тріщин.

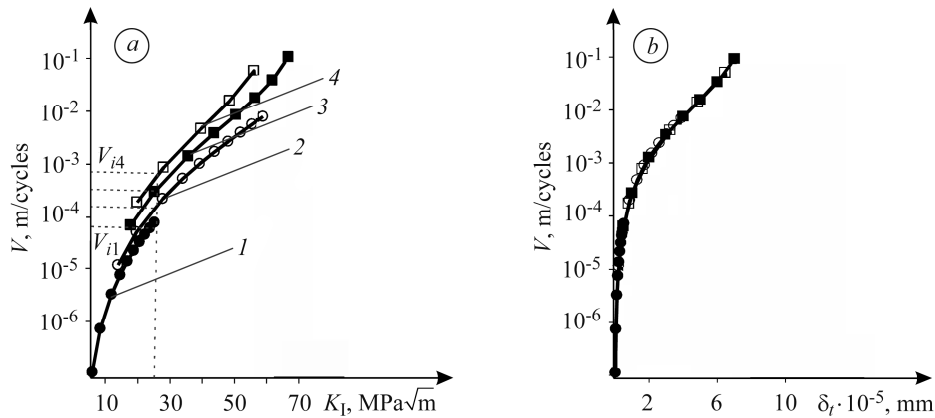


Рис. 3. Кінетичні діаграми $V-K_I$ (a) і $V-\delta_t$ (b) поширення корозійно-втомної тріщини за змін навантажень у числовому експерименті: 1 – $p = 150$ МПа; 2 – 350; 3 – 450; 4 – 500 МПа.

Fig. 3. Kinetic diagrams $V-K_I$ (a) and $V-\delta_t$ (b) of corrosion fatigue cracks propagation for load changes in the numerical experiment: 1 – $p = 150$ МПа; 2 – 350; 3 – 450; 4 – 500 МПа.

Визначення швидкості поширення коротких втомних тріщин у пластинах. Поставивши у формулі (2) $\eta = 0$ для визначення швидкості поширення втомної тріщини, отримаємо співвідношення

$$V = dl / dt = \alpha(1 - R)^4 (\delta_{t\max}^2 - \delta_{th}^2) (\delta_{fc} - \delta_{t\max})^{-1}. \quad (7)$$

Якщо зовнішнє навантаження є достатньо мале $p / \sigma_t \rightarrow 0$ (це буває за великих розмірів тріщини), то співвідношення (4) зводимо до виду

$$V = dl / dt = \alpha(1 - R)^4 (K_{I\max}^4 - K_{th}^4) [E\sigma_t (K_{fc}^2 - K_{I\max}^2)]^{-1}, \quad (8)$$

де K_{fc} – критичне значення КІН за циклічного навантаження; K_{th} – нижнє порогове значення $K_{I\max}$.

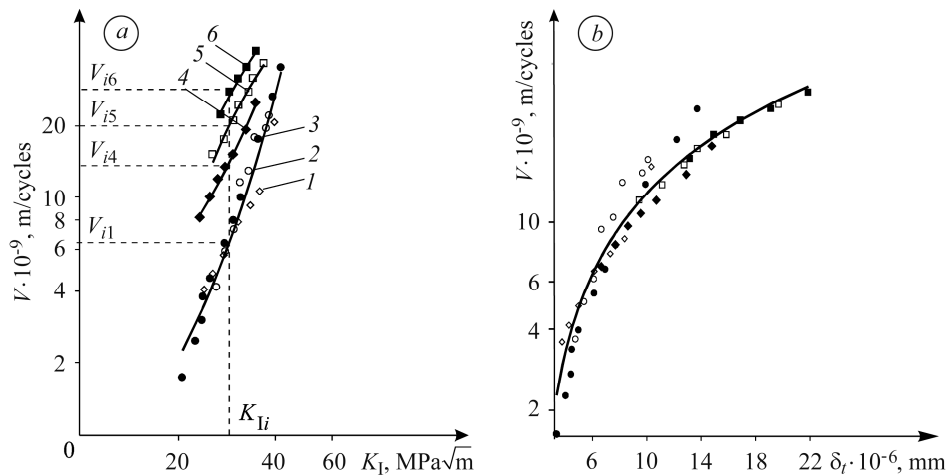


Рис. 4. Кінетичні діаграми $V-K_I$ (a) та $V-\delta_t$ (b) поширення втомної тріщини в сплавi Fe-3% Si [18] за навантажень: 1 – $p = 560$ МПа; 2 – 640; 3 – 720; 4 – 800; 5 – 840; 6 – 880 МПа.

Fig. 4. Kinetic diagrams $V-K_I$ (a) and $V-\delta_t$ (b) of fatigue cracks propagation in Fe-3% Si alloy [18] under loading: 1 – $p = 560$ МПа; 2 – 640; 3 – 720; 4 – 800; 5 – 840; 6 – 880 МПа.

Перевіримо коректність застосування формул (7) і (8) для опису росту коротких втомних тріщин на експериментальних результатах для сплаву Fe-3% Si [18]. Експериментували за навантажень $p = 560; 640; 720; 800; 840; 880$ МПа та побудували діаграму $V-K_I$ (рис. 4a). Як бачимо, для одного і того ж значення КІН можуть бути різні значення швидкості V (див. пунктирна лінія для K_{Ii} на рис. 4a) поширення короткої втомної тріщини. Це ще раз підтверджує, що КІН не може бути інваріантною характеристикою для визначення швидкості поширення короткої втомної тріщини.

Застосуємо співвідношення (7) для визначення швидкості V поширення короткої втомної тріщини в параметрах δ_i , використовуючи формулу (3) і експериментальні результати [18]. На основі цього побудована кінетична діаграма (рис. 4b) росту короткої втомної тріщини (графічна залежність $V-\delta_i$) за різних значень навантажень. Як видно з рис. 4b, всі експериментальні результати [18] лягли, в межах їх розкиду, на одну криву і описуються однією аналітичною залежністю (7). Це підтверджує, що співвідношення (7), а отже і (1), добре описують експериментальні результати та можуть бути застосовані для коректного визначення залишкового ресурсу тонкостінних елементів конструкцій з короткими тріщинами.

Оцінка періоду докритичного росту коротких корозійно-втомних тріщин у тонкостінних елементах конструкцій. Розглянемо тонкостінний елемент конструкції з короткою прямолінійною тріщиною довжини $2l_0$ під циклічним навантаженням зовнішніми зусиллями з силовим параметром p . Вважається, що зовнішні зусилля спричиняють в елементі симетричний відносно лінії розміщення тріщини напружений стан. Задача полягає у визначенні періоду $N = N_*$ докритичного росту корозійно-втомної тріщини.

Для розв'язку такої задачі коректна сформульована вище математична модель (1). Для реалізації цієї моделі необхідно знайти функцію δ_i розкриття у вершині тріщини в замкнутому аналітичному вигляді. Це досить складна задача, тому для цього використаємо наближену формулу (3). Підставляючи її в рівняння (1), отримаємо простішу математичну модель для визначення періоду докритичного росту короткої корозійно-втомної тріщини

$$V = \frac{dl}{dN} = \frac{\alpha(K_{I\max}^2 - K_{sc}^2)[(1-R)^4(K_{I\max}^2 + K_{sc}^2) + \eta E\sigma_t(1-\xi^2)]}{E\sigma_t(1-\xi^2)(K_{fcc}^2 - K_{I\max}^2)}, \quad (9)$$

$$N = 0, \quad l(0) = l_0; \quad N = N_*, \quad l(N_*) = l_*; \quad K_{I\max}(l_*) = \sqrt{E\sigma_t\delta_{fcc}(1-\xi^2)}.$$

Оскільки рівняння (9) ідентичне рівнянню (1), то вважаємо, що і воно буде інваріантне відносно розмірів корозійно-втомної тріщини.

У зв'язку з тим, що в рівнянні (9) змінні розділяються, то його розв'язок можна записати у вигляді

$$N_{\delta_*} = E\sigma_t\alpha^{-1} \int_{l_0}^{l_*} \frac{(1-\xi^2)(K_{fcc}^2 - K_{I\max}^2)dl}{(K_{I\max}^2 - K_{sc}^2)[(1-R)^4(K_{I\max}^2 + K_{sc}^2) + \eta E\sigma_t(1-\xi^2)]}. \quad (10)$$

Якщо б для розв'язання такої задачі використовувати положення лінійної механіки руйнування, тобто математичну модель (4), то її розв'язок виглядав би так:

$$N_{K_*} = E\sigma_t\alpha^{-1} \int_{l_0}^{l_*} \frac{(K_{fcc}^2 - K_{I\max}^2)dl}{(K_{I\max}^2 - K_{sc}^2)[(1-R)^4(K_{I\max}^2 + K_{sc}^2) + \eta E\sigma_t]}. \quad (11)$$

Співвідношення (10) і (11) значно відрізняються за великих навантажень ξ і збігаються при $\xi \rightarrow 0$. Розглянемо це на прикладі задачі Гріффітса.

Реалізуємо сформульовану вище задачу для випадку силової схеми задачі Гріффітса (див. рис. 2). Вважаємо, що виготовлена зі сталі Х70 пластина, знаходиться в ґрунтовому середовищі й циклічно навантажується з амплітудою $p = 400$ МПа. На основі співвідношень (2), (5) і (9) встановили, що критичні довжини тріщини за деформаційним (2) і силовим критерієм (9) відповідно будуть $l_{\delta^*} = 0,0121$ м; $l_{K^*} = 0,0203$ м.

Підставляючи ці значення разом з рівнянням (5) у співвідношення (10) і (11), отримаємо:

$$N_{\delta^*} = \int_0^{0,0121} \frac{7,7 \cdot 10^2 (0,0203 - l) dl}{(l - 1,6 \cdot 10^{-4})(l + 2,5 \cdot 10^{-3})}, \quad (12)$$

$$N_{K^*} = \int_{l_0}^{0,0203} \frac{12,9 \cdot 10^2 (0,0203 - l) dl}{(l - 1,6 \cdot 10^{-4})(l + 4 \cdot 10^{-3})}. \quad (13)$$

Інтеграл у співвідношеннях (12) і (13) знаходимо числово. На основі цього на рис. 5 побудовані графічні залежності $N_{\delta^*} - l_0$ (1) і $N_{K^*} - l_0$ (2). Як бачимо, період докритичного росту короткої корозійно-втомної тріщини (крива 2), обчислений за силовим підходом, більший, як і критична довжина тріщини, ніж за коректним деформаційним. Це означає, що ця похибка піде не в запас довговічності, а в ризик непередбачуваного руйнування. Це ще раз підтверджує, що силовий підхід для визначення докритичного росту коротких втомних і корозійно-втомних тріщин не слід використовувати, бо це може призвести до серйозних помилок і непередбачуваних аварійних ситуацій.

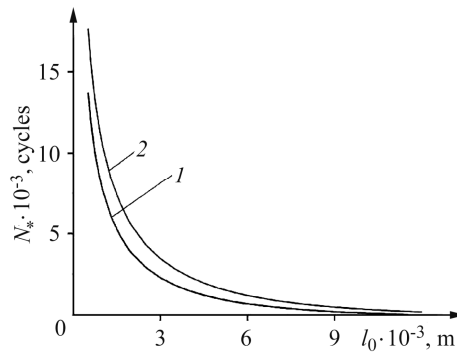


Рис. 5. Залежності періодів докритичного росту короткої корозійно-втомної тріщини: 1 – $N_{\delta^*} - l_0$; 2 – $N_{K^*} - l_0$.

Fig. 5. Dependence of the periods of subcritical growth of a short corrosion-fatigue crack: 1 – $N_{\delta^*} - l_0$; 2 – $N_{K^*} - l_0$.

РЕЗЮМЕ. На основе энергетического подхода разработана расчетная модель для определения через удельные энергетические составляющие периода докритического роста коротких коррозионно-усталостных трещин в упруго-пластических пластинах под действием длительных циклических нагрузок и коррозионных сред. Результаты сопоставимы с известными литературными данными.

SUMMARY. Applying the energy approach the computational model to determine through a specific energy component period of subcritical corrosion-fatigue short cracks growth in elastic-plastic plates under long-term cyclic loads and corrosive environments was developed. The results were compared with the known data in literature.

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. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
3. Дмитрах І. М., Панасюк В. В. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень. – Львів: ФМІ НАНУ, 1999. – 340 с.
4. Ritchie R. O. and Suresh S. Mechanics and physics of the growth of small cracks // AGARD Conf. Proc. – 1983. – № 328. – P. 1.1–1.14.
5. Miller K. J. The behaviour of short fatigue cracks and their initiation. P. II. A general summary // Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct. – 1987. – 10. – P. 93–113.

6. Крижанівський Е. І., Грабовський Р. С., Мандрюк О. М. Оцінювання робоздатності нафтогазопроводів тривалої експлуатації за параметрами їх дефектності // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2013. – **49**, № 1 – С. 105–110.
(Kryzhanivskiy E. I., Hrabovskiy R. S., Mandryk O. M. Estimation of the serviceability of oil and gas pipeline after long-term operation according to the parameters of their defectiveness // Materials Science. – 2013 – **49**, № 1. – P. 117–123.)
7. Small fatigue cracks / D. Daidson, K. Chan, R. Mc Clung, and S. Hudak // Compr. Struct. Integr. – 2003. – **4**. – P. 129–164.
8. Tanaka K. and Akiniwa Y. Modeling of fatigue crack growth: mechanistic models // Compr. Struct. Integr. – 2003. – **4**. – P. 165–189.
9. Герасимчук О. М., Конончук О. В. Модель для прогнозування втомної довговічності титанових сплавів. Повідомлення 1. Розробка моделі втомної довговічності до ініціювання мікроструктурно короткої тріщини і моделі росту фізично малої та довгої тріщини // Проблеми прочності. – 2013. – № 1. – С. 64–79.
10. Nisitani H. and Kawagoishi N. Fatigue crack growth law in small cracks and its application to the evaluation of fatigue life // Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. A. – 1983. – **49**. – P. 431–440.
11. Taylor D. and Knott J. F. Fatigue crack propagation behavior of short cracks; the effect of microstructure // Fatig. Eng. Mater. Struct. – 1981. – **4**. – P. 147–155.
12. Kawagoishi N., Nisitani H., and Toyohiro T. Minimum fatigue crack length for application of small-crack growth law // JSME Int. Jour. Ser. I. – 1992. – **35**. – P. 234–240.
13. Nisitani H. and Goto M. Effect of stress ratio on the propagation of small crack of plain specimens under high and low stress amplitudes (Fatigue under axial loading of annealed 0.45% C steel) // Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. A. – 1984. – **50**. – P. 1090–1096.
14. Nisitani H. and Goto M. Relation between small-crack growth law and fatigue life of machines and structures // Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. A. – 1985. – **51**. – P. 332–341.
15. Small-crack growth behavior of annealed 0.34% C steel plain specimens in oil environments / M. Goto, T. Maehata, H. Nisitani, and H. Miyagawa // Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. A. – 1992. – **58**. – P. 348–352.
16. Statistical investigation of the fatigue life based on small-crack growth law / N. Kawagoishi, H. Nisitani, M. Goto, T. Toyohiro, and S. Kitayama // Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. A. – 1993. – **59**. – P. 57–61.
17. Handbook of Fatigue Propagation in Metallic Structures / Ed. A. Carpinteri. – Oxford: Elsevier Science Ltd., 1994. – 1766 p.
18. Nisitani H., Kawagoishi N., and Goto M. Growth behavior of small fatigue cracks and relating problems // Handbook of Fatigue Propagation in Metallic Structures / Ed. A. Carpinteri. – Oxford: Elsevier Science Ltd., 1994. – P. 733–778.
19. Попович П. В., Цьонь О., Довбуш Т. Вплив експлуатаційних середовищ на поширення поверхневих корозійно-втомних тріщин в елементах конструкцій сільськогосподарських машин // Вісник ТНТУ. – 2014. – № 3(75). – С. 157–166.
20. Розрахункова модель поширення корозійно-механічної тріщини за високих температур / О. Є. Андрейків, І. Я. Долінська, А. Р. Лисик, Н. В. Сас // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – **52**, № 5. – С. 99–105.
(The calculation model of propagation of corrosion-mechanical cracks at high temperatures / O. E. Andreikiv, I. Ya. Dolinska, A. R. Lysyk, N. V. Sas // Materials Science. – 2017. – **53**, № 1. – P. 34–40.)
21. Андрейків А. Е., Дарчук А. И. Усталостное разрушение и долговечность конструкций. – К.: Наук. думка, 1992. – 134 с.
22. Штаюра Н. С. Визначення залишкової міцності тонкостінних елементів конструкцій з короткими тріщинами // Наукові нотатки. – 2017. – № 57. – С. 184–189.
23. Оцінка локальної пошкодженості труб магістральних газопроводів в умовах ґрунтової корозії / О. Андрейків, О. Гембара, О. Цирульник, Л. Ниркова // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – Спец. вип. № 9. – Т. 2. – С. 636–641.
24. Розрахунок залишкової довговічності тривало експлуатованої ділянки магістрального газопроводу / О. Є. Андрейків, О. В. Гембара, О. Т. Цирульник, Л. І. Ниркова // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – **48**, № 2. – С. 103–110.
(Evaluation of residual lifetime of a section of a main gas pipeline after long-term operation / O. E. Andreikiv, O. V Hembara, O. T. Tsyurulnyk, L. I. Nyrkova // Materials Science. – 2012. – **48**, № 2. – P. 231–238.)

Одержано 25.04.2017