

Попович П. Вплив експлуатаційних середовищ на поширення поверхневих корозійно-втомних тріщин в елементах конструкцій сільськогосподарських машин / П. Попович, О. Цьонь, Т. Довбуш // Вісник ТНТУ — Тернопіль : ТНТУ, 2014. — Том 75. — № 3. — С. 157-165. — (Машинобудування, автоматизація виробництва та процеси механічної обробки).

УДК 620.191.33:620.193

П. Попович, канд. техн. наук; О. Цьонь; Т. Довбуш

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ВПЛИВ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ СЕРЕДОВИЩ НА ПОШИРЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ КОРОЗІЙНО-ВТОМНИХ ТРІЩИН В ЕЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦІЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН

Резюме. Аналізуючи злами деталей с/г техніки встановлено, що причиною багатьох руйнувань є дефекти корозійних пітингів при їхньому збільшенні й перетворенні у поверхневі корозійні тріщини. На базі енергетичних підходів, а також відомих з літературних джерел існуючих результатів математичного опису електрохімічних реакцій і окремих положень механіки руйнування вперше запропоновано розрахункову модель для визначення залишкового ресурсу найбільш навантажених елементів несучих систем сільськогосподарських машин з поверхневими тріщинами при сумісній дії циклічних навантажень і експлуатаційних корозійно-агресивних середовищ. Для даного випадку отримано сукупність математичних співвідношень: нелінійне диференціальне рівняння в часткових похідних, початкові й кінцеві умови для визначення залишкового ресурсу навантажених елементів сільськогосподарської техніки.

Ключові слова: елементи конструкцій сільськогосподарських машин, корозійно-агресивні середовища, кінетична діаграма поширення корозійно-втомної тріщини, коефіцієнт інтенсивності напруження, період докритичного росту корозійно-втомних тріщин, залишковий ресурс елементів конструкцій.

P. Popovich, O. Tson; T. Dovbush

IMPACT OF OPERATION MEDIUM ON THE PROPAGATION OF THE SURFACE CORROSION FATIGUE CRACKS IN THE AGRICULTURAL MASHINES STRUCTURAL ELEMENTS

Summary. Assembled steel sections of agricultural machines operate in the conditions of severe corrosion medium. While fertilizing the chemical dust deposits on the structural element surfaces, which, being connected with moisture, creates aggressive medium and results in the sufficient corrosion fracture. While studying the parts wrecking of the agricultural machinery it was found, that the reasons of most fractures are the defects of corrosion pittings, which being increased further transform into surface corrosion cracks. Basing on the power approaches and available literature on the results of the mathematic description of the electrochemical reactions and some fracture mechanics principles the design model for determination of the residual operating life of the mostly loaded elements of the carrier systems of surface cracked agricultural machines under combined action of loadings and operation corrosion-aggressive medium, has been developed for the first time. The complex of mathematic relations for this case was obtained: non-linear differential equation in partial derivatives, initial and final conditions for finding the residual operating life of loaded elements of agricultural machinery, efficient method of the approximate solution being proposed here for the first time from the point of view of the applied mathematics complex task. Realization of this mathematic model was confirmed while analyzing the task of finding the residual operating life of the plate made of machine 17Г1С steel, weakened by the surface crack of semi-elliptic shape, which is under cyclic loadings and placed in the 3% solution of NaCl. It was shown, that insufficient increase of the initial size of the crack decreases greatly the period of pre-critical growth of the corrosion fatigue crack (residual operating life of the agricultural machine element). Application of the developed model was testified by the examples of tasks with finding the residual operating life of structure elements of thin-walled elements cross-sections of the surface-cracked assembled sections.

Key words: agricultural machines structural elements, corrosion-aggressive medium, kinetic diagram of corrosion-fatigue crack propagation, stress intensity factor, period of pre-critical corrosion-fatigue crack growth, residual operating life of structural elements.

Постановка проблеми. На базі енергетичних підходів, а також відомих з літературних джерел існуючих результатів математичного опису електрохімічних реакцій і окремих положень механіки руйнування вперше запропоновано розрахункову модель для визначення залишкового ресурсу найбільш навантажених елементів несучих систем сільськогосподарських машин з поверхневими тріщинами при сумісній дії циклічних навантажень і експлуатаційних корозійно-агресивних середовищ.

Аналіз відомих досліджень і публікацій. Металоконструкції сільськогосподарських машин працюють в умовах дії жорстких корозійних середовищ. При внесенні органічних і мінеральних добрив, обробка полів отрутохімікатами для знищення шкідників на поверхні конструкції осідає пил від хімікатів, котрий у поєднанні з вологою створює агресивне середовище, призводить до інтенсивного корозійного руйнування [1–8]. Швидкість процесу корозії залежить від агресивності середовища, тривалості його дії, температури повітря, стану поверхні металу (складу і структури захисної плівки), хімічного складу металу та наявності механічного напруження, а також від особливостей конструкції – наявності зварних швів, болтових і заклепувальних з'єднань, поєднання окремих елементів, що створюють порожнини або щілини, в яких конденсується волога. Атмосферна корозія деталей сільськогосподарських машин може збільшитися у понад десятеро за наявності агресивних середовищ – мінеральних і органічних добрив, отрутохімікатів, ґрунту. Частинки забруднень, що залишилися після очищення машин, за наявності вологи є хімічно активними і прискорюють процеси корозії. Найглибші пітинги утворюються при корозії деталей у нітрофосці й мідному купоросі. З органічних добрив найбільш корозійний активний торфогноєслужний і торфогнійновий компости, найменше – екскременти корів і гній на їх основі, а також низовинний і поверхневий торф. Наявність забруднення на деталях збільшує корозію, оскільки у поєднанні з вологою вони можуть створювати активне електрохімічне середовище, що викликає інтенсивніші процеси корозії. Корозія найнебезпечніша для деталей, що працюють при циклічних або ударних навантаженнях (пружини, пружинні лапи культиваторів, осі, вали й т.д.). Термін служби деталей унаслідок втомних руйнувань на практиці дуже часто скорочується на 40–60%. При аналізі зломів деталей (лап культиватора, валів тощо) встановлено, що початком багатьох руйнувань послужили виразки від корозії й пітингів. Особливо корозійні пітинги збільшуються і перетворюються в поверхневі корозійні тріщини. Ці, в свою чергу, ростуть і можуть порушити герметичність ємностей або досягти критичних розмірів і призвести до катастрофічного руйнування несучих елементів металоконструкцій сільськогосподарських машин і до непередбачених аварій.

Мета роботи. Розглянути тримірне тіло, послаблене плоскою поверхневою тріщиною з контуром L і початковою площею S_0 , яке навантажене циклічно з амплітудою p , а в тріщину потрапляє корозійно-агресивне середовище (рис.1). При цьому зовнішні навантаження розтягу з амплітудою p прикладені так, що напружено-деформований стан у тілі буде симетричним відносно площини розміщення тріщини, тобто описується в околі її вершини тільки коефіцієнтом інтенсивності напружень K_I . Визначити час кількості циклів навантаження $N = N_*$, після досягнення якого тіло зруйнується.

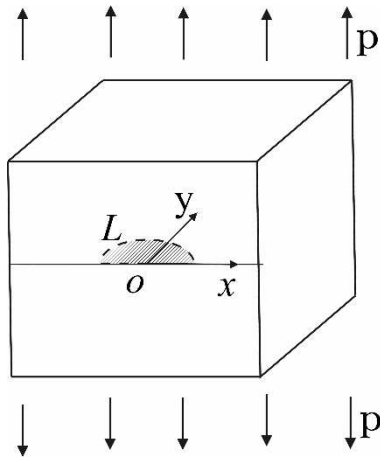


Рисунок 1. Схема навантаження тіла з плоскою поверхневою тріщиною

Figure 1. Scheme of loading of the plane surface cracked body

Результати досліджень. Для розв’язання даної задачі побудуємо математичну модель, тобто диференціальні рівняння з початковими і кінцевими умовами, які описують даний процес. При цьому вважатимемо, що тріщина рухається неперервно від початкової площі $S = S_0$ до кінцевої $S = S_*$. Це припущення є коректним, так як реальний скачкоподібний рух корозійно-втомної тріщини супроводжується скачками малого розміру ΔS_c за відносно великі проміжки часу Δt_c ($\Delta t_c = T\Delta N$, де ΔN – кількість циклів навантаження протягом елементарного стрибка тріщини; T – період циклу). У зв’язку з цим можемо наближено записати швидкість V росту тріщини у такому вигляді:

$$V = \frac{dS}{dt} \approx \frac{\Delta S_c}{\Delta t_c} \quad (1)$$

Аналогічно [9] запишемо рівняння енергетичного балансу для даного нерівноважного процесу

$$Q + A = W + \Gamma + K \quad (2)$$

Тут $Q = const$ – величина теплової енергії; A – робота зовнішніх сил; W – енергія деформування тіла після просування тріщини на величину ΔS_c , яку запишемо аналогічно [10,11] так:

$$W = W_s + W_p^{(1)}(S) + W_p^{(2)}(t) - W_p^{(3)}(t) \quad (3)$$

Враховуючи сказане і диференціюючи за кількістю циклів навантаження N компоненти рівняння енергетичного балансу (2), отримаємо рівняння балансу швидкостей зміни енергетичних складових

$$\frac{\partial A}{\partial N} = \frac{\partial W}{\partial N} + \frac{\partial \Gamma}{\partial N} \quad (4)$$

Враховуючи, що компоненти енергії деформування є складні функції [10,11] від S і N , а площа неявно залежить від N , і підставляючи вираз (3) в (4), отримаємо

$$\frac{\partial}{\partial S} \left[\Gamma - (A - W_s - W_p^{(1)} - W_p^{(2)}) \right] \frac{dS}{dN} - \frac{\partial W_p^{(3)}}{\partial N} + \frac{\partial \Gamma}{\partial N} = 0 \quad (5)$$

Із рівняння (5) знайдено величину швидкості зміни площі тріщини під час її поширення $V = dS/dN$

На основі [9] рівняння (6) можна записати так:

$$\frac{dS}{dN} = \frac{\partial (W_p^{(3)} - \Gamma)}{\partial N} / (\gamma_{fc} - \gamma_t) \quad (7)$$

Для повноти математичної моделі додамо (аналогічно [9]) до рівняння (7) відповідно початкову й кінцеву умови

$$N = 0, \quad S(0) = S_0. \quad (8)$$

$$N = N_*(T), \quad S(N_*) = S_*, \quad (9)$$

де критичне значення площі S_* тріщини і γ_{fC} , γ_t будемо визначати так [9]:

$$\gamma_t(S_*) = \gamma_{fC}, \quad \gamma_{fC} = \sigma_0 \delta_{fC}, \quad \gamma_t = \sigma_0 \int_L \delta_{tmax}^2(s) ds \left[\int_L \delta_{tmax}(s) ds \right]^{-1}. \quad (10)$$

Таким чином, кінетичне рівняння (7) та умови (8)–(10) й складають математичну модель для дослідження докритичного росту корозійно-втомної тріщини в елементах конструкції при симетричному навантаженні.

Реалізація математичної задачі (7)–(10) для конкретних випадків пов'язана зі значними математичними труднощами. У зв'язку з цим спростимо розв'язок задачі, поступаючи аналогічно як і в праці [12].

Залишковий ресурс півпростору з поверхневою тріщиною. Нехай півпростір з плоскою поверхневою тріщиною, в яку потрапляє корозійне середовище, розтягується циклічно в нескінченно віддалених точках рівномірно розподіленими зусиллями з амплітудою p , які направлені перпендикулярно до площини розміщення тріщини (рис.1). Як випливає з результатів [9], швидкість росту розглядуваної вище тріщини V при її прямолінійному поширенні пов'язана з параметрами напружено-деформованого стану в зоні передруйнування такими співвідношеннями:

$$V = f(K_{I\max}), \quad (11)$$

$$f(K_{I\max}) = \frac{\beta_1(1-R)^4(K_{I\max}^4 - K_{scc\max}^4) + \eta_2(K_{I\max}^2 - K_{scc\max}^2)}{K_{fC}^2 - K_{I\max}^2}.$$

Далі поступаємо, як і в роботах [12, 13], таким чином. Розглянемо випадок, коли руйнування проходить в одній площині тривимірного тіла під дією циклічних навантажень і корозійно-агресивного середовища. Оскільки швидкість поширення тріщини V направлена по нормалі до контуру, то переміщення за час ΔN довільної точки M біжучого контуру тріщини в напрямку нормалі (рис.2) визначатиметься так:

$$MM' = \Delta N \cdot V. \quad (12)$$

Звідси приріст радіус-вектора $\Delta \rho$ полярної системи $O\rho\varphi$ (рис.4.13) запишемо у вигляді

$$\Delta \rho = \frac{|MM'|}{\cos \theta} = \frac{\Delta N \cdot V}{\cos \theta}, \quad (13)$$

де θ – кут між напрямком радіус-вектора ρ і нормаллю до контуру тріщини MM' . Із аналізу геометричної побудови на рис. 2 отримуємо [12, 13]

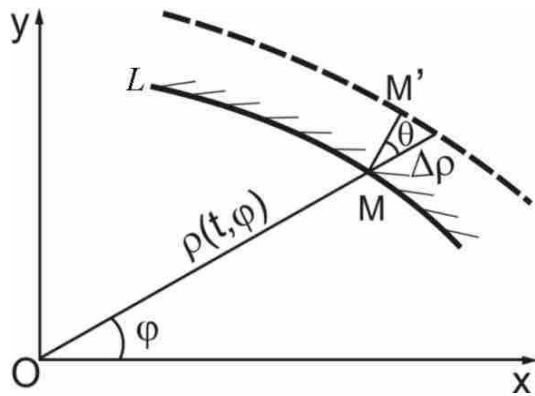


Рисунок 2. Схема локального розвитку плоскої корозійно-втомної тріщини

Figure 2. Scheme of local development of the plane corrosion-fatigue crack

$$\cos \theta = \frac{\rho}{\sqrt{\rho^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial \phi}\right)^2}} \quad (14)$$

Підставляючи (14) в (13) і переходячи до границі при $\Delta N \rightarrow 0$, величину V визначаємо так:

$$V = \frac{\partial \rho}{\partial N} \left(1 + \frac{1}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial \phi} \right)^2 \right)^{-1/2} \quad (15)$$

З іншого боку, на основі (11) і (15), для знаходження невідомої функції $\rho = \rho(N, \phi)$, отримаємо диференціальне рівняння

$$\frac{\partial \rho}{\partial N} = f(K_{I \max}) \left(1 + \rho^{-2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial \phi} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (16)$$

при початкових і кінцевих умовах

$$\begin{aligned} N = 0, \quad \rho(0, \phi_0) &= \rho_0; \\ N = N_*, \quad \rho(N_*, \phi_*) &= \rho_*. \end{aligned} \quad (17)$$

У даному випадку співвідношення (16), (17) визначають задачу для визначення кінетики поширення й періоду N_* докритичного росту плоскої тріщини. Для встановлення величин ρ_* , ϕ_* додається умова (критерій Ірвіна [4])

$$K_{I*}(\rho_*, \phi_*) = K_{Ic} \quad (18)$$

Для реалізації математичної моделі (16)–(18) пропонується наступний наближений підхід [12, 13]. Згідно з ним зміна площі рухомої тріщини розглядуваної конфігурації наближено така, як для півкругової тріщини радіуса a рівної початкової площі, а швидкість поширення контуру такої тріщини приймається сталим у всіх його точках (приймається це для максимального значення $K_{I \max}$, при цьому отриманий залишковий ресурс N_* має похибку в запас довговічності тіла), тобто рівняння (16) спрощується до вигляду

$$\frac{da}{dN} = \frac{\beta_1(1-R)^4 [K_{I \max}^4(a) - K_{scc \max}^4] + \eta_2 [K_{I \max}^2(a) - K_{scc \max}^2]}{K_{fc}^2 - K_{I \max}^2(a)} \quad (19)$$

при початкових і кінцевих умовах

$$\begin{aligned} N = 0, \quad \sqrt{2\pi^{-1}S_0} &= a_0; \\ N = N_*, \quad a(N_*) &= a_*. \end{aligned} \quad (20)$$

При цьому максимальне значення коефіцієнта інтенсивності напружень $K_{I \max}$ для півпростору з поверхневою півкруговою тріщиною за його розтягу зусиллями p визначається на основі результатів роботи [14] так:

$$K_{I \max} = 1.17 p \sqrt{a}. \quad (21)$$

Підставляючи (21) в рівняння (19) й інтегруючи його при умовах (20), для визначення періоду $N = N_*$ докритичного росту корозійно-втомної тріщини початкової площі $S = S_0$ у півпросторі отримаємо формулу

$$N_* = \int_{a_0}^{a_*} \frac{K_{fc}^2 - 1,37ap^2}{\beta_1(1-R)^4 [1,87a^2 p^4 - K_{scc \max}^4] + \eta_2 [1,37ap^2 - K_{scc \max}^2]} da, \quad (22)$$

де $a_0 = \sqrt{2\pi^{-1}S_0}$, $a_* = 0,73K_{fc}^2 p^{-2}$.

Розглянемо випадок, коли матеріал півпростору сталь 17Г1С [15], корозійне середовище – 3%-ний розчин NaCl, що відповідає випадку засолених ґрунтів. При цьому вважається, що частота навантаження 1Гц, асиметрія циклу $R = 0,1$, а амплітуда навантаження $p = 200$ МПа. Критична величина розміру тріщини в даному випадку дорівнюватиме $a_* = 0,237$ м, а кінетична діаграма росту корозійно-втомної тріщини буде описуватися [9] співвідношенням

$$\frac{dl}{dN} \approx \frac{5 \cdot 10^{-6} (K_{I \max}^2 - 25)}{12996 - K_{I \max}^2}. \quad (23)$$

Підставляючи ці дані у формулу (22) й чисельно інтегруючи підінтегральний вираз, отримаємо значення N_*

$$N_* = 2 \cdot 10^5 (a_0 - 0,419 \ln a_0 - 0,84) \text{цикли}. \quad (24)$$

На основі цього на рис.3 побудовано графічну залежність періоду докритичного росту корозійно-втомної тріщини від розміру початкової тріщини a_0 .

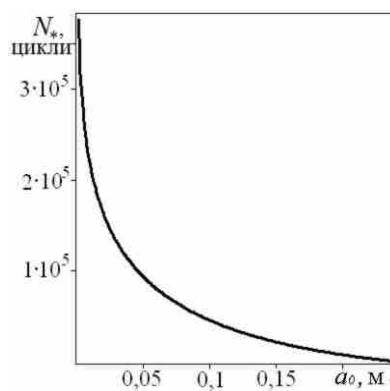


Рисунок 3. Графічна залежність залишкової довговічності N_* пластини від початкового розміру тріщини a_0

Figure 3. Graphic dependence of the residual durability N of the plate on the initial size of the crack a_0

Як бачимо із рис.3, зменшення розмірів a_0 тріщини різко збільшує період докритичного росту тріщини N_* .

Залишковий ресурс пластини з поверхневою півеліптичною тріщиною. Розглянемо нескінченну пластину зі сталі 17Г1С [15] товщини h , яка послаблена поверхневою півеліптичною тріщиною з півосями a_0 і b_0 ($b_0 > a_0$), в яку потрапляє 3%-ний розчин NaCl (рис.4). Вважається, що така пластина розтягується у нескінченно віддалених точках перпендикулярно до площини поширення тріщини рівномірно розподіленими циклічними зусиллями амплітуди p з частотою 1 Гц й асиметрією циклу $R = 0,1$. Задача полягає у визначенні кількості циклів навантаження $N = N_*$, після досягнення якого контур корозійно-втомної тріщини дійде до протилежної поверхні. При цьому вважаємо, що кінетична діаграма поширення корозійно-втомної тріщини в матеріалі пластини описується аналітичною залежністю (23). Дана задача є розрахунковою моделлю для визначення залишкового ресурсу (порушення герметичності) тонкостінних посудин із поверхневими тріщинами.

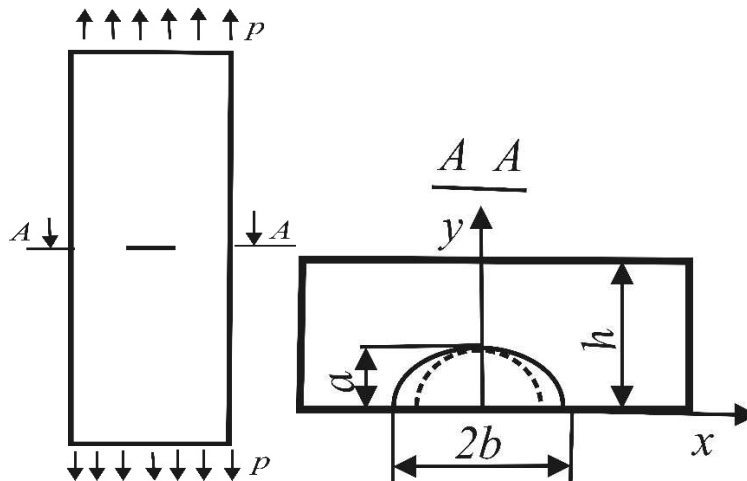


Рисунок 4. Схема розтягу товстої пластини з поверхневою півеліптичною тріщиною

Figure 4. Scheme of stretching of the thick surface semi-elliptic cracked plate

Розв'язок сформульованої вище математичної задачі шукаємо наближено, аналогічно викладеному, методом еквівалентних площ [12,13]. Згідно з цим методом зміна площі внаслідок поширення корозійно-втомної тріщини розглядуваної конфігурації буде наближено така, як для півкрової тріщини радіуса a такої ж початкової площі, а швидкість поширення точок її контур приймається наближено однаковою. Замінюючи дану задачу модельною, в якій контур тріщини в пластині півколовий радіус a обмежує площу, що дорівнює півеліптичній реальній тріщині, вибираємо найбільше значення КІН уздовж такого кругового контуру, а саме [14]:

$$K_I = 2p\sqrt{h\pi^{-1}}F(\varepsilon), \quad F(\varepsilon) = \sqrt{\varepsilon}(1,01 + 0,067\varepsilon^3)(1,57 - 0,51e^{-0,21\varepsilon^2}), \quad \varepsilon = ah^{-1}. \quad (25)$$

Підставляючи (25) в (23), для визначення періоду $N = N_*$ отримаємо рівняння

$$\frac{d\varepsilon}{dN} \approx \frac{5 \cdot 10^{-6} h^{-1} [4h\pi^{-1} p^2 F^2(\varepsilon) - 25]}{12996 - 4h\pi^{-1} p^2 F^2(\varepsilon)} \quad (26)$$

при початковій і кінцевій умовах

$$N = 0, \quad \varepsilon = \varepsilon_0 = h^{-1} \sqrt{a_0 b_0}; \quad N = N_*, \quad \varepsilon = 1.$$

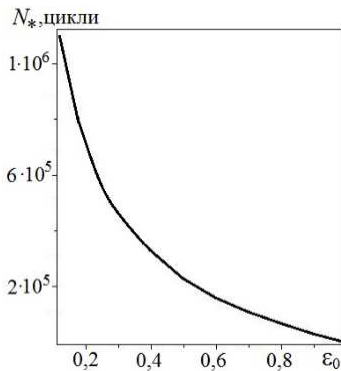


Рисунок 5. Графічна залежність періоду N_* росту в пластині поверхневої корозійно-втомної тріщини від її початкового розміру ε_0

Figure 5. Graphic dependence of period N of the corrosion-fatigue surface crack grown

Для визначення $N = N_*$ проінтегруємо (26) в межах заданих початкової і кінцевої умов. В результаті цього отримаємо

$$N_* = 2 \cdot 10^5 h \int_{\varepsilon_0}^1 \frac{[12996 - 4h\pi^{-1} p^2 F^2(\varepsilon)]}{[4h\pi^{-1} p^2 F^2(\varepsilon) - 25]} d\varepsilon. \quad (27)$$

Для числового аналізу співвідношення (27) прийmemo, що $h = 0.04$ м, $P = 70$ МПа. В результаті цього співвідношення (27) набуде вигляду

$$N_* = 8 \cdot 10^3 \int_{\varepsilon_0}^1 \frac{12996 - 250F^2(\varepsilon)}{250F^2(\varepsilon) - 25} d\varepsilon. \quad (28)$$

За допомогою формули (28) на рис. 5 побудована графічна залежність періоду N_* росту корозійно-втомної тріщини від її початкового розміру ε_0 .

Як бачимо з рис.5, незначне збільшення початкового розміру ε_0 тріщини значно зменшує її період докритичного росту (залишковий ресурс пластини).

Висновки. Для випадку дії циклічних навантажень і корозійно-агресивних середовищ на елементи сільськогосподарських машин із поверхневими тріщинами отримано сукупність математичних співвідношень (нелінійне диференціальне рівняння в часткових похідних, початкові й кінцеві умови) для визначення залишкового ресурсу таких елементів. При цьому запропоновано ефективний метод наближеного розв'язку такої в математичному розумінні складної задачі. Реалізація такої математичної моделі продемонстровано на задачі визначення залишкового ресурсу пластини зі сталі 17Г1С, послабленої поверхневою півеліптичною тріщиною, підданої дії циклічним навантаженням у 3%-му розчині NaCl. Показано, що незначне збільшення початкового розміру тріщини значно зменшує період докритичного росту корозійно-втомної тріщини (залишковий ресурс пластини).

Conclusions. For the case, when the surface-cracked agricultural machines structural elements are subject to the cyclic loadings and corrosion-aggressive medium, the complex of mathematic relations (non-linear differential equation in partial derivatives, initial and final conditions) have been obtained for finding the residual operating life of such elements. Efficient enough method of the approximate solution of such complex task has been proposed. Realization of this mathematic model was confirmed while finding the residual operating of the plate made of 17Г1С steel, weakened by the surface semi-elliptic crack subject to the cyclic loading in the 3% NaCl solution. It was shown, that insufficient increase of the initial size of the crack decreases greatly the period of pre-critical grown of the corrosion-fatigue crack (residual operating life of the plate).

Список використаної літератури

- Северный, А.Э. Сохраняемость и защита от коррозии сельскохозяйственной техники [Текст] / А.Э. Северный. – Москва : ГОСНИТИ, 1993. – 233 с.
- Похмурський, В.І. Корозійна втома металів і сплавів [Текст] / В.І. Похмурський, М.С. Хома. – Львів : Сполом, 2008. – 299 с.

3. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов [Текст] / О.Н. Романив, С.Я. Ярема, Г.Н. Никифорчин, Н.А. Махутов, М.М. Стадник.– Київ: Наукова думка, 1990.– 680 с.
4. Черепанов, Г.П. Механика хрупкого разрушения [Текст] / Г.П. Черепанов.– М.: Наука, 1974.– 640 с.
5. Дмитрах, І.М. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень [Текст] / І.М. Дмитрах, В.В. Панасюк. – Львів: ФІМІ НАНУ, 1999. – 340 с.
6. Корнеєнко, С.В. Ресурси підземного геологічного простору України [Текст] / С.В. Корнеєнко, О.М. Корбутяк // Вісн. Київ. ун-ту. Геологія. – 2008. – №43. – С.51–53.
7. Корнієнко, С. Проблеми впливу ґрунтового середовища на корозію магістральних газопроводів України [Текст] / С. Корнієнко, О. Корбутяк // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія. – 2009. – 46. – С.42–43.
8. Мальцева, Г.Н. Коррозия и защита оборудования от коррозии [Текст] / Г.Н. Мальцева . – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2000. – 457 с.
9. Попович, П. Залишковий ресурс тонкостінних конструктивних елементів несучих систем сільськогосподарських машин при дії агресивних середовищ [Текст] / П. Попович, Н. Хомик, Л. Добровольська // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2014. – Вип.146 – С.142–151.
10. Андрейків, О.Є. Визначення залишкової довговічності тонкостінних елементів конструкцій при двохосьовому навантаженні [Текст] / О.Є. Андрейків, М.Б. Кіт // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2006. – №1. – С.11–16.
11. Андрейків, О.Є. Визначення періоду докритичного росту тріщин в елементах конструкцій при їх двохчастотному навантаженні [Текст] / О.Є. Андрейків, М.Б. Кіт // Машинознавство – 2006р. – №2. – С.3–9.
12. Андрейків, О.Є. Докритичний ріст плоскої тріщини в тривимірному тілі за високотемпературної повзучості [Текст] / О.Є. Андрейків, Н.Б. Сас. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2008р. – №2. – С.19–26.
13. Андрейкив, А.Е. Усталостное разрушение и долговечность конструкций [Текст] / А.Е. Андрейкив, А.И. Дарчук. – К.: Наук. думка, 1992. – 184 с.
14. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений [Текст]; под. ред. Мураками. – М.: Мир, 1990. – Т.1,2. – 1016 с.
15. Tsyulnyk O.T., Petryna D.Yu. Hredil M.I. The fracture peculiarities of trunk pipeline steels after their long term service // Proceedings of the international conference on Crack paths (CP 2006) 14th – 16th September 2006 – Parma (Italy). Paper N61.

Отримано 20.03.2014