ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА ФРАНКА

Механіко-математичний факультет

Кафедра механіки

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної (дипломної) роботи

бакалавр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему

Залишкова міцність пластини з системою періодичних тріщин в умовах корозивних середовищ

Виконав: студент IV курсу,
група МТП-41,
спеціальність 113 Прикладна математика
спеціалізація Математичне моделювання та комп'ютерна механіка

Вальничок Т.М.

Керівник *доц. Долінська І.Я.*

Рецензент Доц., д.т.н. Юздрович Р.
Зав. відділу методів та засобів відбору й обробки діагностичних сигналів ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАНУ

Львів - 2023

ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені ІВАНА ФРАНКА

Факультет механіко-математичний
Кафедра механіки
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Спеціальність **113 прикладна математика**
(шифр і назва)
Спеціалізація Математичне моделювання та комп'ютерна механіка

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Завідувач кафедри механіки
_____ проф. Андрейків О.Є.
"23" лютого 2023 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ (ДИПЛОМНУ) РОБОТУ СТУДЕНТУ

Вальничку Тарасу Михайловичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема роботи Залишкова міцність пластини з системою періодичних тріщин в умовах корозивних середовищ

керівник роботи доц. Долінська І. Я.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені Вченою радою факультету від "22" лютого 2023 року № 7
2. Строк подання студентом роботи 12 червня 2023 року
3. Вихідні дані до роботи 1. Андрейків О.Є. Визначення залишкового ресурсу тріщин за впливу корозивного середовища / О.Є. Андрейків, І.Я. Долінська, С.В. Настасяк, М.С. Шефер // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2021. – №5. – С. 32 – 37; 2. Долінська І. Оцінка залишкового ресурсу тонкостінних елементів конструкцій з системами тріщин за цикл. навантаження і високої температури
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Вступ; 2. Математичне моделювання росту систем корозійно-механічних тріщин; 3. Розрахункова модель для визначення залишкової довговічності пластини з періодичною системою корозійно-механічних тріщин; 4. Визначення залишкової довговічності пластини з дволопеpіодичною системою тріщин за дії корозійного середовища; 5. Висновки; 6. Список використаних джерел.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної (дипломної) роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка

Студент _____ (підпис) Вальничок Т.М. (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ (підпис) Домісвка Т.Я. (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП……..3

РОЗДІЛ 1. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОСТУ СИСТЕМ КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНИХ ТРІЩИН……...4

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ ПЛАСТИНИ З ПЕРІОДИЧНОЮ СИСТЕМОЮ КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНИХ ТРІЩИН……...8

РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ ПЛАСТИНИ З ДВОЯКОПЕРІОДИЧНОЮ СИСТЕМОЮ ТРІЩИН ЗА ДІЇ КОРОЗІЙНОГО СЕРЕДОВИЩА…….17

ВИСНОВКИ…… ..20

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……..21

ВСТУП

Значна кількість інженерних конструкцій, машин та споруд тривалої експлуатації передчасно втрачають працездатність внаслідок зародження і поширення тріщин. Ситуація значно ускладнюється, коли поряд із тривалими навантаженнями (статичними та маневровими) діють агресивні середовища особливо корозивні, що зумовлюють ріст корозійно-механічних тріщин. Тоді для оцінки працездатності елементів конструкцій виникає необхідність в застосуванні розрахункових методів для оцінювання комплексного впливу експлуатаційних чинників на міцність і довговічність елементів конструкцій, які б ураховували механізми корозійного руйнування.

На зародження і розвиток корозійно-механічних тріщин впливають низка інших чинників, що призводять до зменшення залишкової міцності та довговічності елементів конструкцій. Вплив цих чинників стараються ураховувати дослідники-науковці будуючи моделі для дослідження міцності і довговічності елементів конструкцій. В літературі сьогодні відомо низку розрахункових моделей для дослідження росту корозійно-механічних тріщин у конструкційних матеріалах і визначення періоду їх докритичного росту. Більшість із відомих моделей описують розвиток одинарних тріщин. Однак на практиці все частіше трапляються випадки поширення систем тріщин в елементах конструкцій, які експлуатуються в корозивних середовищах.

З огляду на це, метою дипломної роботи є побудова розрахункової моделі для визначення залишкової міцності і довговічності пластин, послаблених системою тріщин, які перебувають під дією агресивного корозивного середовища і довготривалого статичного навантаження.

Для побудови розрахункової моделі застосовано відомий в літературі енергетичних підхід для дослідження розвитку корозійно-механічних тріщин в металевих елементах конструкцій.

РОЗДІЛ 1. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОСТУ СИСТЕМ КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНИХ ТРІЩИН

На практиці все частіше трапляються випадки руйнування тонкостінних елементів конструкцій в умовах корозійних середовищ внаслідок поширення в них систем тріщиноподібних дефектів. Тому виникає потреба у визначенні періоду докритичного росту таких тріщин. Тут потрібно мати відповідні розрахункові моделі, які б описували процес поширення тріщин. Застосовуючи енергетичний підхід, запропонований в працях Андрейківа О.Є. [1] для дослідження росту корозійно-механічної тріщини побудовано розрахункову модель (диференціальні рівняння) для визначення періоду докритичного росту системи тріщин у металевих пластинах, які піддаються довготривалому статичному розтягу і локальній електрохімічній корозії. Саме період докритичного росту тріщин і визначатиме залишкову довговічність.

Формулювання математичної моделі. Для побудови диференціальних рівнянь розглянемо металеву пластину в якій поширюється система m макроскопічних тріщин. Пластина піддається дії тривалого статичного навантаження і корозивного середовища. Під час експлуатації корозивне середовище потрапляє в вершину тріщини, де реалізуються механізми електрохімічної корозії. За таких заданих умов навантаження тріщини в пластині поширюватимуться як корозійно-механічні тріщини. Вважаємо, що конфігурація пластини та геометричне розміщення тріщин визначаються лінійними параметрами $a_1, \ldots, a_k$, а геометрична конфігурація кожної тріщини – параметрами $b_1,\ldots,b_m$. При цьому приймаємо такі параметри: для випадку $a_q \to \infty$ $(q = 1, 2, \ldots, k)$ отримуємо необмежену пластину, яка послаблена однією тріщиною конфігураціїb_j. Далі вибираємо у z– вій вершині кожної тріщини $L^{(j)}$ локальну систему координат $O^{(j,z)}\rho^{(j,z)}\theta^{(j,z)}$ (рис.1.1) і позначимо $\Delta l^{(j,z)}$ – приріст j –вої тріщини відповідно на її кінцях $(z = 1, 2)$. Силове навантаження характеризується параметром p. Задача полягає у визначенні

періоду докритичного росту однієї із тріщин $L^{(e)}$, тобто часу $t = t_*$ за який ця тріщина проросте до певного розміру $l^{(e)} = l_*^{(e)}$, який буде критичним для даної пластини. За такого розміру тріщини пластина зруйнується.

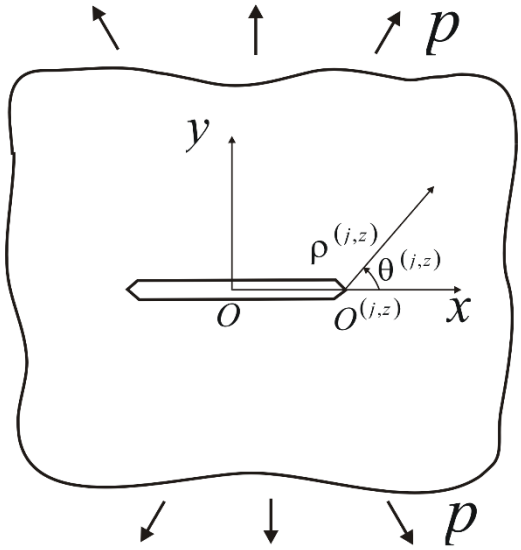

Рис. 1.1. Схема навантаження пластини з тріщиною.

Для реалізації такої задачі зробимо узагальнення на такий випадок сформульованого у праці [1] енергетичного підходу для дослідження розвитку одинарних тріщин в пластині за дії корозійного середовища. Також застосуємо відому в літературі [2] гіпотезу. Згідно гіпотези, корозійно-механічні тріщини будуть поширюватися в напрямку максимально можливих їх швидкостей. На основі енергетичного підходу і гіпотези реалізацію задачі зведемо до розв'язання такої системи диференціальних рівнянь

$$\frac{dl^{(j,z)}}{dt} = \frac{d\left(\Gamma^{(j,z)}\right)}{dt}\left(\gamma_{CC} - \gamma_t^{(j,z)}\right)^{-1},$$
$$\frac{\partial}{\partial\theta^{(j,z)}}\left[\frac{d\left(\Gamma^{(j,z)}\right)}{dt}\left(\gamma_{CC} - \gamma_t^{(j,z)}\right)^{-1}\right]_{\theta^{(j,z)}=\theta_t^{(j,z)}} = 0 \qquad (1.1)$$

за початкової

$$t = 0, \quad l^{(j,z)}(0) = l_0^{(j,z)} \qquad (1.2)$$

і кінцевої умов

$$t = t_*,\ l^{(e,z)}(t_*) = l_*^{(e,z)}, (j = 1, \ldots, m;\ \ z = 1,2). \qquad (1.3)$$

Критичне значення довжини тріщини знаходимо з енергетичного критерію

$$\gamma_t^{(e,z)}\left(l_*^{(e,z)}\right) = \gamma_{CC}\,; \max_j\left[\gamma_t^{(j,z)}\left(l_*^{(j,z)}\right)(\gamma_{CC})^{-1}\right] = \gamma_t^{(e,z)}\left(l_*^{(e,z)}\right), \qquad (1.4)$$

Тут $\Gamma^{(j,z)}(t) -$ енергія руйнування металевого матеріалу елемента конструкції, яка залежить від площі z–вої тріщини L_j, часу і корозійного середовища частина роботи пластичних деформацій;

$\gamma_t^{(j,z)}$ –величина роботи пластичних деформацій в зоні передруйнування біля вершин тріщини L_j;

γ_{fC} –її критичне значення;

$\theta_t^{(j,z)}$– значення кутів $\theta^{(j,z)}$, що визначають напрямок поширення кінців L_j тріщини;

$l_*^{(j,z)}$– критичне підростання z –вого кінця тріщини L_j за руйнування пластини. Згідно викладок в праці [1] ці величини визначатимемо так:

$$\frac{d\Gamma^{(j,z)}}{dt} = -\alpha_1\sigma_t\left[\left(\delta_{\mathrm{I}\theta}^{(j,z)}\sigma_{0f}^{(j,z)} + \delta_{\mathrm{II}\theta}^{(j,z)}\tau_{0f}^{(j,z)}\right) - \left(\delta_{\mathrm{scc}\theta}^{(j,z)}\sigma_{0f}^{(j,z)} + \delta_{scc\theta}^{(j,z)}\tau_{0f}^{(j,z)}\right)\right],$$

$$\delta_{\mathrm{I}t}^{(j,z)} = \frac{(K_{\mathrm{I}\theta}^{(j,z)})^2}{2E\,\sigma_{0f}^{(j,z)}}, \gamma_{CC} = \delta_{CC}\sigma_{0f} = \frac{K_{IC}^2}{E}, \delta_{\mathrm{II}t}^{(j,z)} = \frac{(K_{\mathrm{II}\theta}^{(j,z)})^2}{2E\,\tau_{0f}^{(j,z)}},$$

$$\gamma_t^{(j,z)}(l) = \delta_t^{(j,z)}\sigma_t^{(j,z)} = \delta_{\mathrm{I}t}^{(j,z)}\sigma_{0f}^{(j,z)} + \delta_{\mathrm{II}t}^{(j,z)}\tau_{0f}^{(j,z)},$$

$$\gamma_{scc}^{(j,z)} = \delta_{scc}^{(j,z)}\sigma_{0f}^{(j,z)}, \qquad (1.5)$$

де $\gamma_{scc}^{(j,z)}$ – величина роботи пластичних деформацій в зоні передруйнування біля вершини z j–вої тріщини, яка не викликає її корозійно-механічного поширення;

$\delta_t^{(j,z)}$– розкриття в зоні передруйнування біля вершини z тріщини L_j;

$\delta_{\mathrm{I}\theta}^{(j,z)}$, $\delta_{\mathrm{II}\theta}^{(j,z)}$– проекції $\delta_t^{(j,z)}$ на напрямні орти полярної системи координат $O^{(j,z)}\rho^{(j,z)}\theta^{(j,z)}$ (див. рис. 1.1.);

$\sigma_t^{(j,z)}$– усереднені напруження в зоні передруйнування біля вершини z тріщини L_j;

$\sigma_{0f}^{(j,z)}$, $\tau_{0f}^{(j,z)}$ – відповідні їх проекції;

$K_{\mathrm{I}}^{(j,z)}$, $K_{\mathrm{II}}^{(j,z)}$– коефіцієнти інтенсивності напружень біля z– вої вершини j-вої тріщини вздовж лінії її розміщення;

$K_{\mathrm{I}\theta}^{(j,z)}$, $K_{\mathrm{II}\theta}^{(j,z)}$– аналогічні значення вздовж напрямку під кутом θ до дотичної в z– вому кінці j– вої тріщини.

Отже, кінетичні рівняння (1.1) за умов (1.2)-(1.4) з врахуванням співвідношення (1.5), а також за відомих коефіцієнтів інтенсивності напружень $K_{\mathrm{I}}^{(j,z)}$, $K_{\mathrm{II}}^{(j,z)}$ це є математична модель для визначення залишкової довговічності пластини із системою тріщин в умовах дії рівномірного статичного розтягу і корозивного середовища. Далі застосуємо цю математичну модель до розв’язання конкретних задач про визначення залишкової довговічності пластини з періодичною системою корозійно-механічних тріщин та пластини з двояко періодичною системою корозійно-механічних тріщин.

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ ПЛАСТИНИ З ПЕРІОДИЧНОЮ СИСТЕМОЮ КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНИХ ТРІЩИН

Постановка задачі. Розглянемо необмежену пластину, що піддана розтягу в безмежно віддалених точках рівномірно розподіленими зусиллями інтенсивності p і послаблена періодичною системою прямолінійних тріщин довжини $2l_0$, розташованих уздовж прямої під кутом $\theta = 45°$ до напряму дії зовнішніх зусиль на відстані $2(h - l)$ одна від одної, яка знаходиться під дією довготривалого статичного розтягу і впливу корозивного середовища (рис 2.1). Вважаємо, що корозивне середовище потрапляє в тріщини, що сприяє їх корозійно-механічному поширенню. Задача полягає у визначенні часу $t = t_*$, за який тріщини підростуть до критичного розміру $l = l_*$ і пластина зруйнується.

Слід зазначити, що кожна тріщина буде поширюватися з однаковою швидкістю і в однаковому напрямку. При розв'язанні другого рівняння системи (1.1) приходимо до висновку, що тріщина буде поширюватися приблизно [2, 3] перпендикулярно до напрямку дії зусиль p.

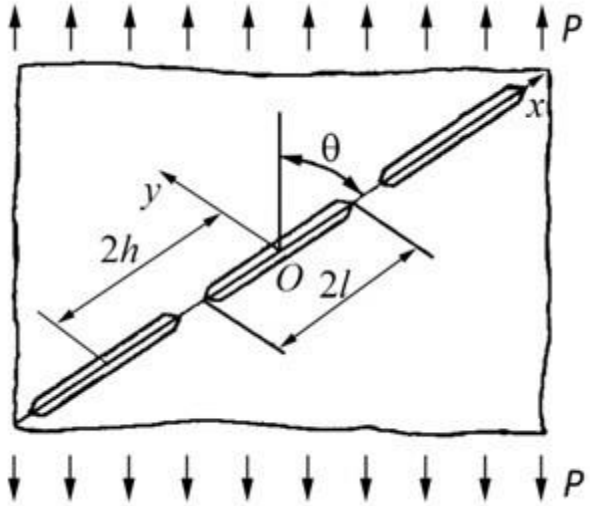

Рис. 2.1. Силова схема розтягування необмеженої пластини з періодичною системою прямолінійних тріщин.

Для розв'язку даної задачі застосуємо математичну модель (1.1)-(1.3). З урахуванням вище наведених міркувань для даного випадку математичні співвідношення (1.1)-(1.3) набудуть вигляду

$$\frac{dl}{dt} = \alpha_1 \frac{K_{\mathrm{I}}^2 - K_{scc}^2}{K_{\mathrm{I}C}^2 - K_{\mathrm{I}}^2}, \tag{2.1}$$

з початковою і кінцевою умовами

$$t = 0,\ l(0) = l_0,\ t = t_*,\ l(t_*) = l_*. \tag{2.2}$$

Тут K_{I} – коефіцієнт інтенсивності напружень;

K_{IC}, K_{scc} – верхнє і нижнє порогові значення коефіцієнта інтенсивності напружень K_{I} . K_{scc} – це таке значення K_I, за якого не відбувається корозійно-механічне поширення тріщин;

α_1 – константа, яку визначають із експерименту.

Критичний розмір тріщини l_* визначаємо за силовим підходом – критерієм Ірвіна

$$K_I(l_*, p) = K_{IC}. \tag{2.3}$$

Щоб розв'язати математичну задачу (2.1)-(2.3) необхідно знати значення коефіцієнта інтенсивності напружень K_I для даного випадку. Для визначення коефіцієнта інтенсивності напружень біля вершини тріщини використаймо метод граничної інтерполяції [4]. Цей метод використовують для наближеного розв'язання багатопараметричних задач теорії тріщин. В його основу закладено інтерполяційний підхід. З його допомогою розв'язання багатопараметричних задач теорії тріщин відбувається за допомогою розв'язків їх граничних випадків – однопараметричних задач. Відповідно до цього коефіцієнт інтенсивності напружень K_{I} можна представити так

$$K_I = \sigma\alpha, \tag{2.4}$$

де σ і α- відповідно силова і геометрична частини K_I.

Визначення коефіцієнта K_I здійснимо за допомогою методу граничної інтерполяції. Для цього досліджуємо граничні її випадки $\Lambda = lh^{-1} < 1$, якщо $\Lambda \to 0$ і $\Lambda \to 1$.

Випадок, коли $\Lambda \to 0$, відповідає задачі про розтягування зусиллями p необмеженої пластини з прямолінійною тріщиною завдовжки $2l$, розміщеної під кутом θ до напрямку дії зусиль p (рис. 2.2).

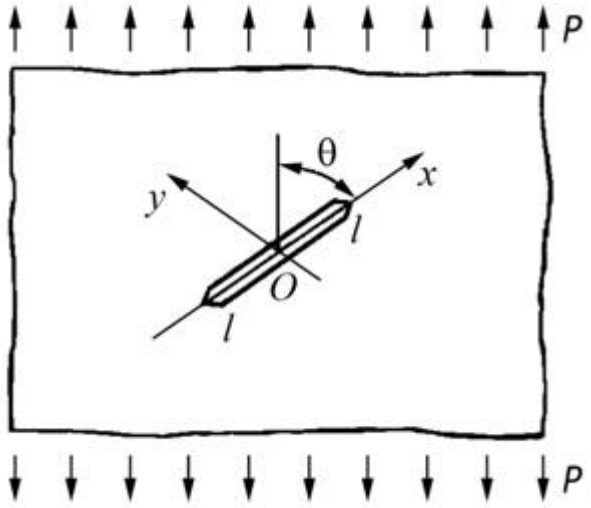

Рис. 2.2. Силова схема розтягування необмеженої пластини з одною тріщиною.

Для даного випадку силову та геометричну частини K_I запишемо у такому вигляді

$$\sigma^{(0)} = p\sin^2\theta, \alpha_1 = \sqrt{\pi l}. \tag{2.5}$$

Якщо $\Lambda \to 1$, маємо задачу про розтягування зовнішніми зусиллями з модулем головного вектора $P = 2ph$ необмеженої пластини, що складається з двох півплощин, з'єднаних по перешийку завдовжки $2(h - l)$ (рис. 2.3). При цьому вважаємо, що лінія тріщини направлена під кутом θ до напряму дії головного вектора P зовнішніх зусиль.

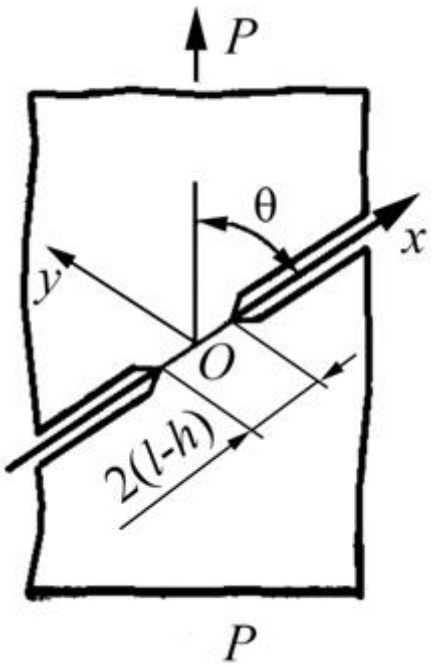

Рис. 2.3. Силова схема розтягування необмеженої пластини, що складається з двох півплощин, з'єднаних по перешийку.

На підставі результатів праці [4] отримаємо:

$$\sigma^{(1)} = p(1 - \Lambda)^{-1}\sin^2\theta, \alpha_2 = 2\pi^{-1/2}\sqrt{h - l}\,. \tag{2.6}$$

Величини σ, α будуть визначатися через $\alpha_1, \alpha_2, \sigma^{(0)}, \sigma^{(1)}$ за наступними формулами

$$\alpha = \frac{\alpha^{(0)}\alpha^{(1)}}{\sqrt{(\alpha^{(0)})^2 + (\alpha^{(1)})^2}}\,. \tag{2.7}$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_1^2 - (\sigma_1)_{\lambda=0}^2} \ . \tag{2.8}$$

Підставляємо (2.5), (2.6) у (2.7), (2.8) для визначення наближених значень σ, α і отримаємо формули:

$$\alpha = \frac{\sqrt{\pi l}\frac{2}{\sqrt{\pi}}\sqrt{h-l}}{\sqrt{\pi l + \frac{4}{\pi}(h-l)}} = \frac{2\sqrt{l(h-l)}}{\sqrt{\frac{l}{\pi}(\pi^2-4)+\frac{4h}{\pi}}}, \tag{2.9}$$

$$\sigma = \sqrt{p^2 sin^4\theta + \frac{p^2 sin^4\theta}{(1-\lambda)^2} - \frac{p^2 sin^4\theta}{1^2}} = \frac{p sin^2\theta}{1-\lambda} = \frac{p}{1-\lambda} \ . \tag{2.10}$$

Отримані формули (2.9) та (2.10) ми підставляємо у (2.4) для визначення наближеного значення КІН біля вершини тріщини:

$$K_I = \frac{2p\sqrt{l(h-l)}}{(1-\lambda)\sqrt{\frac{l}{\pi}(\pi^2-4)+\frac{4h}{\pi}}} \ . \tag{2.11}$$

Отже математичні співвідношення (2.1)-(2.3) разом з рівністю (2.11) становлять задачу для визначення залишкової довговічності пластин з періодичною системою тріщин.

Для числової реалізації задачі застосуємо конкретний випадок пластини зі сталі 45ХН2МФА, яка піддається статичному розтягу зусиллями p і перебуває в умовах корозивного середовища – дистильованої води або у водному розчині відомого неорганічного інгібітора корозії Cu^{+2}. Характеристики матеріалу пластини в умовах дистильованої води вибираємо на основі праці [1] $K_{scc} =$ 9 МПа·м$^{1/2}$, $K_{IC} = 60$ МПа·м$^{1/2}$, $\alpha_1 = 8{,}3 \cdot 10^{-4}$ м/год.

Прирівнявши знайдений КІН біля вершини тріщини до відповідних значень K_{scc} та K_{IC} та врахувавши значення $h = 0.02$ м, знайдемо умови (2.12) та (2.13), за якими визначимо відповідно початкову l_0 та граничну l_* довжини тріщин.

$$\frac{2p\sqrt{l(h-l)}}{(1-\lambda)\sqrt{\frac{l}{\pi}(\pi^2-4)+\frac{4h}{\pi}}} = K_{scc}\ , \tag{2.12}$$

$$\frac{2p\sqrt{l_*(h-l_*)}}{(1-\lambda)\sqrt{\frac{l_*}{\pi}(\pi^2-4)+\frac{4h}{\pi}}} = K_{IC}\ . \tag{2.13}$$

З цих умов відповідні значення довжин будуть рівні $l_0 = 0.008492$ м та $l_* = 0.009960$ м.

На підставі формул (2.1), (2.2) формула для визначення періоду докритичного росту корозійно-механічної тріщини t_* отримає наступний вигляд:

$$t_* = \frac{1}{\alpha_1} \cdot \int_{l_0}^{l_*} \frac{K_{IC}^2 - K_{\mathrm{I}}^2(l)}{K_{\mathrm{I}}^2(l) - K_{scc}^2} dl. \tag{2.14}$$

За співвідношенням (2.14) з урахуванням (2.11)-(2.13) і характеристик матеріалу на рис 2.4 побудовано залежність залишкової довговічності пластини t_*, від зміни статичного навантаження p, $260 \leq p \leq 300$ МПа.

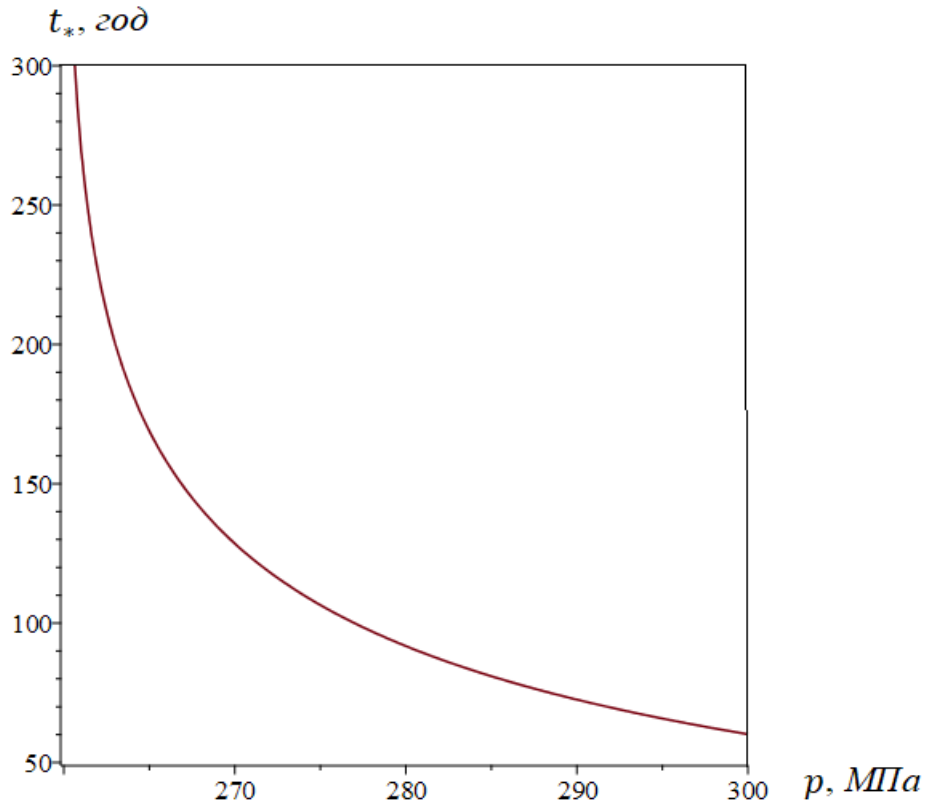

Рис 2.4. Залежність періоду докритичного росту тріщин в пластині від зміни статичного навантаження в умовах дії дистильованої води.

Як бачимо з рисунку збільшення параметра навантаження призводить до зменшення періоду докритичного росту тріщини, а отже – зменшення залишкової довговічності пластини.

Для відвернення корозивного руйнування сьогодні застосовують різні протикорозійні засоби. В тому числі одними із ефективних є застосовування інгібіторів корозії, які суттєво зменшують швидкість росту тріщин. Розглянемо конкретний випадок дії на пластину зі сталі 45ХН2МФА водного розчину неорганічних інгібіторів корозії Cu^{+2}. У даному випадку характеристики матеріалу пластини вибираємо на основі праці [1]: $K_{scc} = 9$ МПа·м$^{1/2}$,$K_{IC} = 60$ МПа·м$^{1/2}$, $\alpha_1 = 4{,}757 \cdot 10^{-4}$ м/год. Підставивши ці дані в рівняння (2.14) на рис. 2.5 побудовано залежність періоду докритичного росту корозійно-

механічної тріщин від зміни навантаження в умовах дії на пластину водневого розчину неорганічного інгібітора Cu^{+2}.

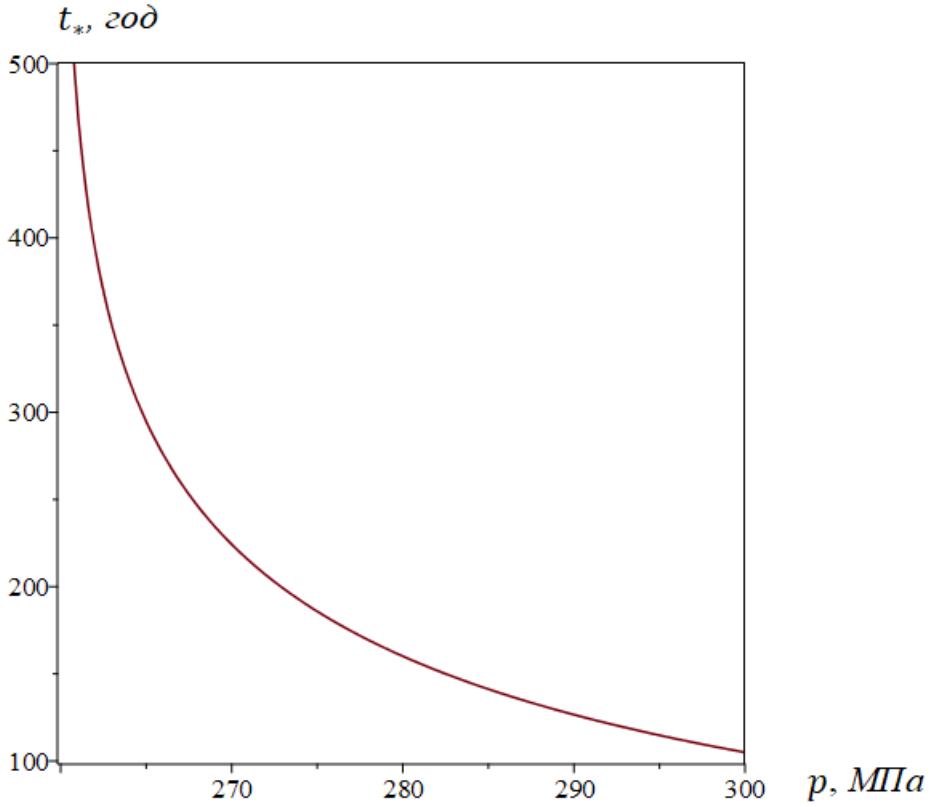

Рис. 2.5. Залежність періоду докритичного росту тріщин в пластині від зміни статичного навантаження в умовах дії водневого розчину неорганічного інгібітора Cu^{+2}.

Водночас на рис. 2.6 наведено графічні залежності залишкової довговічності пластини з періодичною системою тріщин в умовах дистильованої води (крива 1), а також в умовах водневого розчину неорганічного інгібітора.

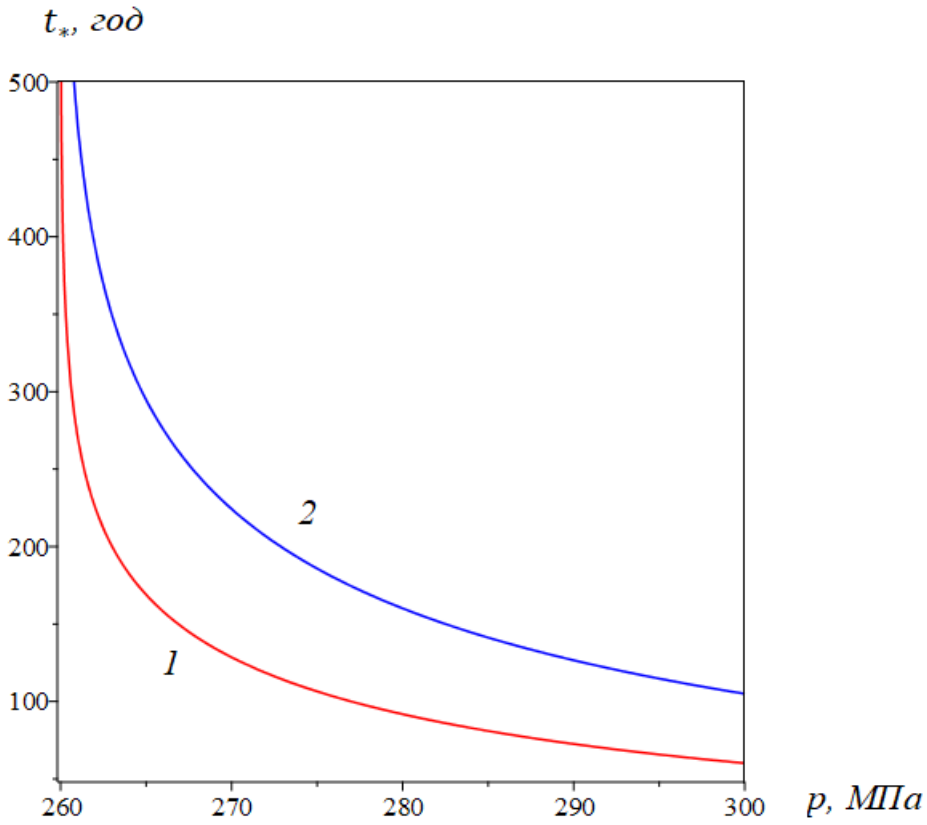

Рис. 2.6. Залежність періоду докритичного росту тріщини в пластині від зміни статичного навантаження в умовах дії корозивного середовища: 1 – дистильована вода, 2 – інгібітор Cu^{+2}.

Використовуючи рис. 3.6, дослідимо вплив інгібіторів на залишкову довговічність пластини. Отримані результати (див. криві *1*, *2*) показують, що Cu^{+2} є ефективним інгібітором корозії, оскільки його застосування підвищило залишкову довговічність пластини. Водночас збільшення параметра навантаження призводить до різкого зменшення залишкової довговічності пластини.

РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ ПЛАСТИНИ З ДВОЯКОПЕРІОДИЧНОЮ СИСТЕМОЮ ТРІЩИН ЗА ДІЇ КОРОЗІЙНОГО СЕРЕДОВИЩА

Постановка задачі та метод її розв'язання. Розглянемо нескінченну пластину, послаблену двояко періодичною системою прямолінійних тріщин довжини $2l_0$, центри яких розміщені у вузлах квадратної решітки із стороною d (рис. 3.1). Вважається, що пластина контактує з одним із наступних корозивних середовищ: дистильована вода або водний розчин відомих неорганічних інгібіторів корозії – Cu^{+2}. Також пластина на нескінченності піддається дії довготривалого статичного розтягу. При цьому навантаження прикладені так, що напружено-деформований стан пластини симетричний відносно лінії розміщення тріщин. При потраплянні середовища в тріщини і дії силового чинника вони розвиватимуться, що може призвести до руйнування пластини. Необхідно визначити залишкову довговічність пластини.

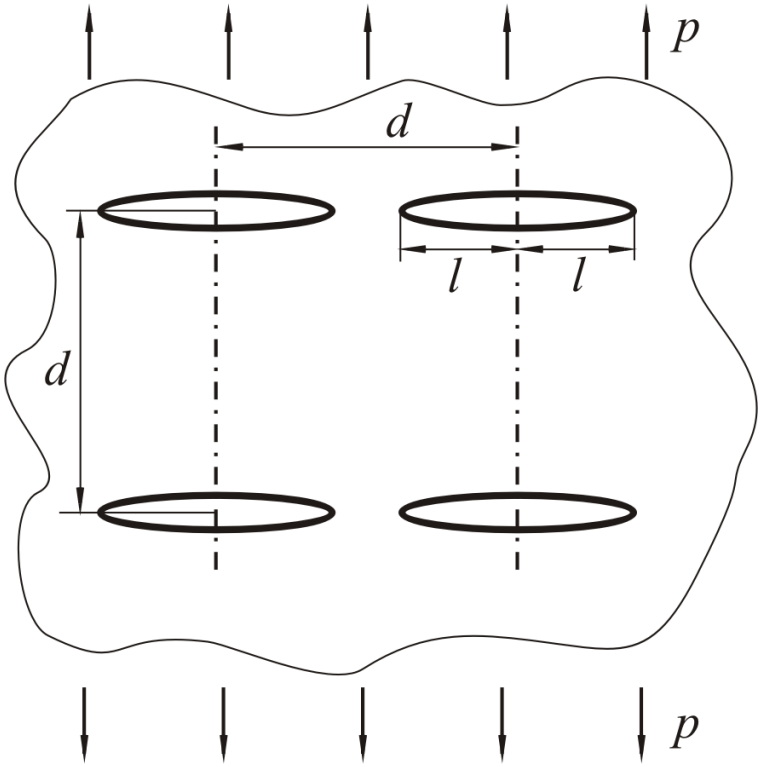

Рис. 3.1. Схема навантаження пластини з системою двоякоперіодичних тріщин.

Розв'язок цієї задачі реалізуємо на основі математичної моделі (1.1)–(1.4). Оскільки навантаження до пластини прикладені таким чином, що створюють симетричний відносно лінії розміщення тріщин напружено-деформований стан, то математичні співвідношення (1.1)–(1.4) зведуться до вигляду (2.1), (2.2). При цьому необхідно знати коефіцієнт інтенсивності напружень.

Для даної задачі K_{I} запишемо у вигляді [5]

$$K_I = p\sqrt{(\pi l)}\left(1 + 8{,}8 \cdot 10^{-2}\pi\lambda^2 + 1{,}8 \cdot 10^{-2}\pi^2\lambda^4 - 2{,}6 \cdot 10^{-3}\pi^3\lambda^6 + O(\lambda^8)\right), \tag{3.1}$$

де $\lambda = 2ld^{-1}$.

Для числової реалізації математичного співвідношення (3.1) застосуємо конкретний випадок пластини зі сталі 45ХН2МФА з таким ж характеристиками, як в попередньому випадку при $d = 0.03$ м, $l_0 = 0.0011422$ м та $l_* = 0.0199359$ м. Підставивши ці дані у вираз (2.14), зможемо побудувати графічну залежність залишкового ресурсу t_* від зміни статичного навантаження p, $150 \leq p \leq 200$ МПа (рис 3.2). Як бачимо зі збільшенням навантаження залишковий ресурс пластини значно зменшується, а застосування інгібіторів корозії має позитивний вплив на довговічність елементів конструкцій.

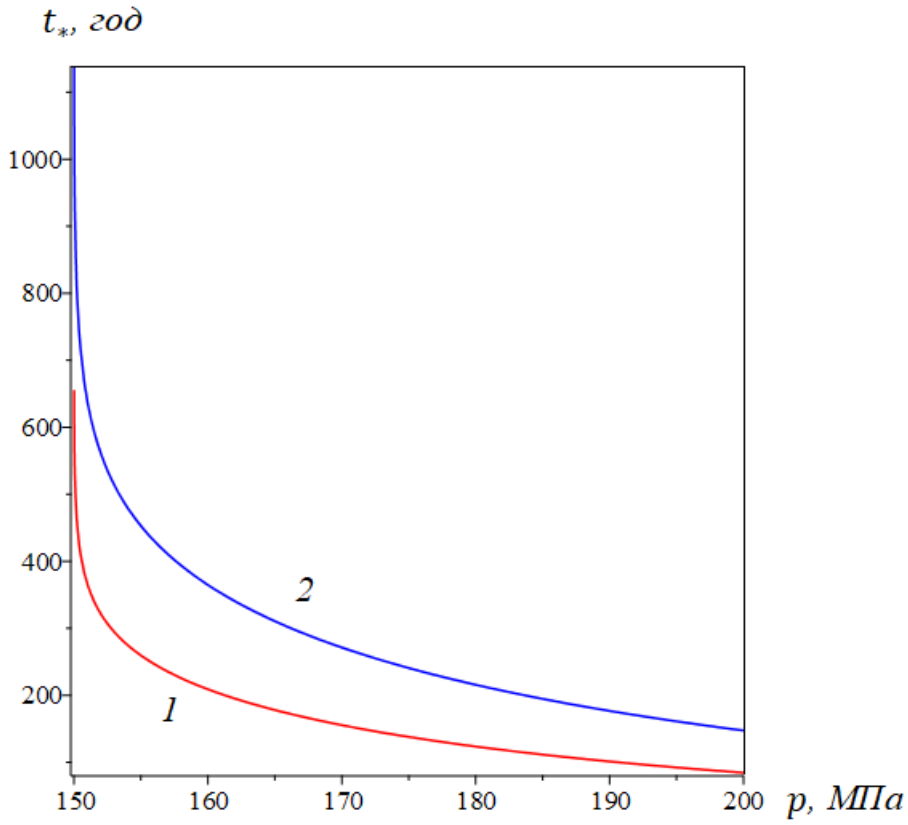

Рис. 3.2. Залежність залишкової довговічності пластини від зміни навантаження: *1* – дистильована вода, 2 – Cu^{+2};

ВИСНОВКИ

1. Застосовуючи енергетичний підхід побудовано розрахункову модель для визначення залишкової довговічності пластини з системою тріщин, яка знаходиться в умовах корозивного середовища.

2. На основі моделі розв’язано задачі про визначення залишкової довговічності пластин з системою періодичних тріщин та двояко періодичною системою тріщин за дії довготривалого статичного розтягу в умовах дистильованої води та водневого розчину неорганічного інгібітора Cu^{+2}.

3. Встановлено, що зі збільшенням навантаження залишкова довговічність пластини значно зменшується, а застосування інгібіторів корозії має позитивний вплив на довговічність елементів конструкцій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андрейків О.Є. Визначення залишкового ресурсу торсіона за впливу корозивного середовища / О.Є. Андрейків, І.Я. Долінська, С.В. Настасяк, М.С. Шефер // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2021. – № 5. – С. 32–37.

2. Andreykiv O. E. Strength of thin-walled structural elements with cracks under the conditions of creep / O. E. Andreykiv, N. B. Sas // Materials Science. – 2007. – Vol. **43**, № 2. – P. 174–182.

3. Андрейків О. Є. Циклічна міцність тонкостінних елементів конструкцій з тріщинами / О. Є. Андрейків, Ю. В. Банахевич, М. Б. Кіт // Доповіді НАН України. – 2009. – № 7. – С. 56–62.

4. Панько І.М. Теоретичні основи інженерних методів для оцінки тріщиностійкості матеріалів і елементів конструкцій. – Львів: Національна академія наук України. Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка, 2000. – 280 с.

5. Долінська І. Оцінка залишкового ресурсу тонкостінних елементів конструкцій з системами тріщин за циклічного навантаження і високої температури // Тези доповідей конференції молодих учених із сучасних проблем механіки і математики ім. акад. Я. С. Підстригача. (25–27 травня 2011 р., м. Львів). Львів, 2011. С. 91–92.