#### ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА ФРАНКА

Механіко-математичний факультет

Кафедра механіки

## Пояснювальна записка

до кваліфікаційної (дипломної) роботи <u>бакалавр</u> (освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему

# Залишкова міцність пластини, яка послаблена двома боковими тріщинами в умовах корозивного середовища

Виконала: студентка IV курсу, група МТП-41, спеціальність <u>113 Прикладна математика</u> спеціалізація <u>Математичне моделювання</u> <u>та комп'ютерна механіка</u>

Суприган М.В.

Керівник доц. Долінська І.Я.

Рецензент *Дод., д.т.н. Юзеровиг Р.* Зав. віддіпу шехозів та засобів відбоку ї дбробки діагное тичших сигналів РМЭ 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) Математичне моделювання та комп'ютерна механіка Спеціалізація «ЗАТВЕРДЖУЮ» Завідувач кафедри механіки проф. Андрейків О.Є. 2023 року 110morp ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ (ДИПЛОМНУ) РОБОТУ СТУДЕНТУ Mapun hpuran Ima (прізвище, ім'я, по батькові) 1. Тема роботи Залинико Macin help CINA 10KQ NOCHADRE ADKOBUL abour ham 6 020 керівник роботи Юол (прізвище, ім'я, по батькові, науковий булинь, вчене звання) ORK затверджені Вченою радою факультету від "22" лютого 2023року № 2. Строк подання студентом роботи 12 Zepburg 2023 3. Вихідні дані до роботи Араренке Decyps mulukobozo 1200 cepead ach 10 C. QK -9091-115 nexall, norm O 4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) ~ a 2 pece roporti mpille DIC epiana Cepeable MARCO NURM 0 W roomble в Cepo a obueyo 4N 0 5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

mare .

## 6. Консультанти розділів роботи

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

## 7. Дата видачі завдання

# КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ 3/П	Назва етапів кваліфікаційної (дипломної) роботи	Строк виконання стаців роботи	Примітка
5	window anomyre as we	отапь росоти	
1	might muldarat anode an	1001 m	0.901
25	and action operation and and	Juli C 20	aun
	POR, To D DALENIN	1000	
_			
	and an of 30 Diving and		
	Sund of analogan uppedag	a stad a dee	23.800
Ì	A MARCANE ALL QUINDONN	Summer on C	1000 \$
10	apoll. 1906 to a would fig 1	administ.	Y.R.B.
12	Ser and the second day as	viu's-or	with the
			0
	and a change of the server	NUMBER	
1	a pick input the perpendicular a	1 quinto	Capago
	STONDING CONTRACTOR STOND STON	AND MARK	prepary
000	CORNER SOMMAND	po niver	proport
	and and and and and are	the particular	MOL1
	and a manager a second the second	11102/2	want

Студент

Керівник роботи

Duiucera (прізвище та ініціали) иідпис

### **3MICT**

ВСТУП2
РОЗДІЛ 1. ВПЛИВ КОРОЗІЙНО-АГРЕСИВНОГО СЕРЕДОВИЩА НА РІСТ
ТРІЩИН
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ РОСТУ ТРІЩИН В МАТЕРІАЛАХ,
ЯКІ КОНТАКТУЮТЬ ІЗ КОРОЗІЙНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ11
РОЗДІЛ З. ЗАЛИШКОВА МІЦНІСТЬ ПЛАСТИНИ, ЯКА ПОСЛАБЛЕНА
ДВОМА БОКОВИМИ ТРІЩИНАМИ В УМОВАХ КОРОЗИВНОГО
СЕРЕДОВИЩА
ВИСНОВОК 19
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

#### ВСТУП

З аналізу експлуатаційної практики відомо, що корозійне середовище посилює руйнування металевих матеріалів за довготривалого навантаження (статичного чи циклічного) і викликає зародження та подальше поширення корозійно-механічних тріщин. Для визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій за цих умов необхідно мати відповідні розрахункові моделі. Більшість із відомих побудовані на основі конкретних експериментальних результатах. Використовуючи їх, можна визначити залишковий ресурс лише деяких елементів конструкцій із тих матеріалів для яких були проведені експериментальні дослідження. У працях Андрейківа О.Є. з учнями побудовані математичні моделі для дослідження корозійно-механічного руйнування конструкційних матеріалів на основі фізичних законів. Застосування якої дає можливість розв'язувати задачі про дослідження кінетики і оцінювання періоду докритичного розвитку тріщин в елементах конструкцій, які тривало експлуатуються в умовах корозійного середовища і силового навантаження.

Метою даної дипломної роботи є побудова розрахункової моделі для визначення залишкової довговічності пластини, яка послаблена двома боковими тріщинами і працює в умовах довготривалого статичного розтягу і корозійного середовища.

Для досягнення мети використано модель розвитку корозійно-механічної тріщини, а також метод граничної інтерполяції для визначення наближеного значення коефіцієнта інтенсивності напружень. Встановлено, що збільшення навантаження пластини призводить до зменшення залишкової довговічності пластини.

#### РОЗДІЛ 1. ВПЛИВ КОРОЗІЙНО-АГРЕСИВНОГО СЕРЕДОВИЩА НА РІСТ ТРІЩИН

Вплив корозійного чинника на тріщиностійкість матеріалів. Розрізняють [1], [2] три основних механізми впливу корозивного середовища на тріщиностійкість конструкційних матеріалів: адсорбційний спад міцності, водневе окрихчення та хімічне розчинення. Адсорбція поверхнево активних речовин на поверхні високо напруженого матеріалу в вершині тріщини призводить до зменшення поверхневої енергії і полегшує руйнування (ефект Ребіндера). Основним процесом, котрий прискорює докритичний ріст тріщини, призводить до аварійних ситуацій, є окрихчення малої області поблизу вершини тріщини. Атомарний водень, який завжди присутній в чистому або зв'язаний з нейтральними молекулами вигляді, в результаті дифузії здатний проникати в будь-які метали. Розчинність водню за нормальної температури і тиску складає від 10 см<sup>3</sup> до 100 см<sup>3</sup> на 1 кг металу. Окрихчення спостерігається [1], [2] вже за концентрації в 2 см<sup>3</sup> на 1 кг металу, а з 10 см<sup>3</sup> на 1 кг і вже є небезпечним. Найуразливішим для проникнення водню є ділянки нової поверхні металу, не захищені окисною плівкою.

Основні типи кінетичних діаграм корозійно-втомного росту тріщин наведені в працях [1], [2]. За їх результатами видно, що корозійні середовища можуть суттєво змінювати конфігурацію діаграм, отриманих під час аналогічних дослідженнях в інертному середовищі. Для сплавів, не схильних до корозійного розтріскування, кінетична діаграма має *S*-подібний вигляд. Зменшення частоти навантаження зсуває її в бік більших швидкостей росту [1], [2]. На діаграмах сплавів, що схильних до корозійного розтріскування, для  $K_{max} = K_{ISCC}$ спостерігається прискорення швидкості росту тріщини, з подальшим виходом на горизонтальну ділянку [1], [2].

Сталі низької та середньої міцності за статичного навантаження в слабо корозійних середовищах мало чутливі до корозійного розтріскування. Проте за циклічного навантаження вплив середовища виражений сильніше і він зале-

жить від частоти навантаження, на відміну від випробувань на повітрі. Для сталі 20Г встановлено, що за випробувань в дистильованій воді для фіксованого значення КІН спостерігається максимум прискорення росту тріщини на середньоамплітудній ділянці кінетичної діаграми втомного руйнування (КДВР) за частоти навантаження 0,01 Гц [3]. Проте для інших сталей вплив середовища на ріст втомної тріщини може монотонно зростати із зменшенням частоти навантаження. Той факт, що за зниження частоти навантаження в області дуже низьких частот швидкість росту тріщини повинна досягти насичення і перейти через максимум, можна було передбачити, виходячи з відомих даних нечутливості низькоміцних сталей до корозійного розтріскування, оскільки в області низьких частот превалює фактор квазістатичного навантаження. А положення максимуму впливу середовища на ріст втомної тріщини по відношенні до частоти залежить від конкретної системи метал–середовище, так і від умов навантаження – асиметрії, температури і т.п.

На корозійний ріст втомної тріщини на середньоамплітудній ділянці КДВР низькоміцних сталях впливає також і форма циклу навантаження. Для сталі 20ХН2МФА показано, що характер зміни та кількісна оцінка впливу середовища для трикутної форми циклу і циклу з позитивним зубом практично ідентичні з синусоїдальним циклом. Тоді як навантаження за прямокутним циклом або циклу з від'ємним зубом не спричиняло прискорення росту втомної тріщини у всьому діапазоні частоти навантаження. Випробування за умов навантаження пульсуючим трапецеїдальним циклом із різною тривалістю витримки за максимального навантаження показало, що незважаючи на фактичну зміну частоти навантаження швидкість росту втомної тріщини в сталі X65 (типу 20Г з мікролегуванням) не залежить від тривалістю витримки за максимального навантаження, а цілком і повністю визначається тривалістю етапу активного навантаження [3].

Максимальний вплив корозійного середовища на ріст втомної тріщини проявляється на середній та верхній ділянках кінетичної діаграми втомного руйнування за низької частоти навантаження. За даними [2] чутливість цих

сталей до дії корозійного середовища починає проявлятися за частоти 1 Гц і посилюється з її зниженням до 0,017 Гц. За подальшого зменшення частоти вплив середовища дещо послаблюється. Швидкість росту втомної тріщини характеризується високою чутливістю до асиметрії. Вона збільшується з ростом останньої.

Оцінки циклічної тріщиностійкості за низької частоти та високої асиметрії представляють особливий інтерес враховуючи умови експлуатації реальних виробів технологічного обладнання (див. рис. 1.1). Особливо вони необхідні під час дослідження різних зон зварного з'єднання, для якого характерні високі залишкові напруження.



Рисунок 1.1 – Кінетика корозійно-втомного руйнування сталі А533-В при 1 Гц і значеннях *R* рівних 0,05 (1), 0,16 (2), 0,22 (3), 0,25 (4), 0,7 (5).

За катодної поляризації на кінетичній діаграмі втомного руйнування трубної сталі X65 появляється плато, в межах якого швидкість росту втомної тріщини не залежить від КІН. Зі зменшенням частоти навантаження швидкість росту тріщини на плато збільшується [2].

Помірковане наводнювання гладких зразків експлуатованих сталей спричиняє різке падіння їх пластичності за повільного розтягу [4], що свідчить

про високу схильність металу до корозійного розтріскування за механізмом водневого окрихчення. Істотніший його вплив під час випроб зразків з тріщиною. Порогове значення КІН сталі Х60 порівняно із випробами на повітрі  $K_{IC}$  падає вдвічі, а сталі Х70 – майже втричі. Сталі Х70 властива і суттєво вища середня швидкість корозійно-статичного росту тріщини.

Наводнювання суттєво змінює характеристики корозійно-циклічної тріщиностійкості в припороговій області кінетичної діаграми втомного руйнування та на початку ділянки Періса (рис. 1.2; табл. 1.1) [4]. Характерною особливістю кінетичної діаграми втомного руйнування є чітко виражені плато незалежності швидкості росту втомної тріщини від розмаху  $\Delta K$ , які відтворюють чутливість сталей до корозійно-статичного росту тріщини. Менша корозійно-циклічна тріщиностійкість сталі X70, а також експлуатованого металу проявилася і в нижчих значеннях порога корозійної втоми  $\Delta K_{thc}$ , розмаху КІН початку плато  $\Delta K_{SCC}$  і швидкості росту втомної тріщини  $V_{SCC}$ , яка відповідає цьому плато.



Рисунок 1.2 – Кінетична діаграма втомного руйнування сталей X60 (*a*) і X70 (б) у повітрі (1, 2) та корозивному середовищі за катодної поляризації –1,2 V (3, 4): 1, 3 – труба запасу; 2, 4 – експлуатована.

С	Стан металу	$\Delta K_{thc},$	$\Delta K_{SCC}$ ,	$V_{SCC}$ ,
таль		МПа√м		м/цикл
Х	Труба запасу	11,1	11,5	1,4.10-7
60	Експлуатована	9,0	9,8	5,6.10-7
Х	Труба запасу	10,0	11,1	4,9.10-7
70	Експлуатована	6,2	7,3	2,1.10-6

Таблиця 1.1 – Характеристики корозійно-циклічної тріщиностійкості сталей

Вплив корозійного чинника на зародження тріщини. Корозивне середовище як додатковий фактор за втоми металів звичайно значно зменшує опір появі початкових тріщин. Одні автори скорочення етапу зародження тріщини пояснюють електрохімічною гетерогенністю матеріалу в активних площинах ковзання, що призводить до утворення піттингів (останні самі по собі можуть бути як вихідними дефектами, так і додатковими концентраторами напружень). Інші автори пов'язують пришвидшення зародження тріщин з розміцненням захисних плівок на поверхні металу. Такі плівки утворюються у зв'язку із витримкою зразка в корозійному середовищі, однак вони піддаються руйнуванню у лініях інтенсивного ковзання. Виникає гальванопара з малою анодною ділянкою в зоні руйнування плівки і значною катодною, якою служить суцільний оксидний шар на поверхні зразка. Таким чином, пришвидшується локальне розчинення металу в смугах ковзання, період зародження  $N_3$  суттєво скорочується.

Корозійно-статична тріщиностійкість конструкційних сталей. Автори [5] проводили дослідження корозійного руйнування під напруженням сталі 45ХН2МФА в дистильованій воді при різних відпусках. Виявили, що у випадку низьковідпущеної сталі (відпуску 470 К) зі збільшенням силового навантаження КІН швидкість поширення корозійної тріщини збільшується (див. рис. 1.3), що характерно для крихких матеріалів.



Рисунок 1.3 – Кінетичні діаграми швидкості росту тріщини сталі 45ХН2МФА в дистильованій воді і водних розчинах традиційних органічних і неорганічних інгібіторів корозії: відпуск 470 К; × – дистильована вода,
0 – тіосечовина, ► – моностаноламін, ▼ – бензоат, ◊ – уротропін, • – PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>, ▲ – CrO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, Δ – Cu<sup>+2</sup>, □ – NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, ■ – NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

Водночас такі дослідження проводили для тієї ж сталі при високій термообробці (відпуск 720 К) в умовах дії дистильованої води [5]. Виявили, що зі збільшенням навантаження швидкість поширення корозійно-механічної тріщини досягаючи свого максимуму виходить на плато і за подальшого збільшення коефіцієнта інтенсивності напружень приблизно залишається постійною (рис. 1.4). Це можна пояснити так. За високої термічної обробки матеріал стає більш пластичним, а для таких матеріалів характерним є галуження тріщин.



Рисунок 1.4 – Кінетичні діаграми швидкості росту тріщини сталі 45ХН2МФА в дистильованій воді і водних розчинах традиційних органічних і неорганічних інгібіторів корозії: відпуск 720 К, о – дистильована вода, ▲ – тіосечовина,
► – бензоат натрію, ■ – уротропін, × – моноетаноламін, ∨ – Ca<sup>+2</sup>, □ – Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>-2</sup>,

•  $-\operatorname{CrO}_{4}^{-2}$ ,  $\nabla -\operatorname{NO}_{2}^{-2}$ .

Вплив інгібіторів на швидкість корозійного розтріскування. Порівняльна оцінка ефективності низки відомих інгібіторів корозії і корозійного розстріскування на прикладі системи сталь 45ХНМФА (відпуск при 470 К)– дистильована вода показала (рис. 1.3), що застосування органічних інгібіторів, а також оксаіонів  $\text{CrO}_{4}^{-2}$ ,  $\text{PO}_{4}^{-3}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{-2}$  не впливає на кінетику руйнування. Разом з тим, аніони  $\text{NO}_{3}^{-}$  і  $\text{NO}_{2}^{-}$  суттєво зменшують швидкість росту тріщини. Ефективними інгібіторами також виявилися катіони  $\text{Cu}^{+2}$ .

Підвищення температури відпуску сталі 45ХН2МФА до 725 К призводить до збільшення її корозійно-статичної тріщиностійкості і створює сильніший захисний ефект більшості досліджуваних оксааніонів (рис. 1.4). Крім аніонів  $NO_3^-$  і  $NO_2^-$ , які ефективно гальмували швидкість росту тріщини в низько відпущеній сталі, ефект від інгібіторів виявлений також у оксааніонів  $\operatorname{CrO}_{4}^{-2}$ ,  $\operatorname{PO}_{4}^{-3}$ ,  $\operatorname{Cr}_{2}\operatorname{O}_{7}^{-2}$ .

Водночас попадання в дистильовану воду катіонів  $Cu^{+2}$  не забезпечило ефекту від інгібіторів під час оцінки корозійно-статичної тріщиностійкості високо відпущеної сталі 45ХН2МФА. Після відпуску при 720 К захисна дія оксааніонів відчутніша порівняно із реалізуючою під час низького відпуску. Однак, в області ефективності захисту вони зберігають один і той самий порядок (рис. 1.4).

## РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ РОСТУ ТРІЩИН В МАТЕРІАЛАХ, ЯКІ КОНТАКТУЮТЬ ІЗ КОРОЗІЙНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ

Формулювання задачі. Розглядається тонкостінний елемент конструкції пластина з наскрізною прямолінійною тріщиною, яка має початкову довжину  $l_0$ і знаходиться під дією тривалого статичного розтягу та корозійного середовища (рис. 2.1). Середовище проникає в вершину тріщини, що призводить до корозійно-механічного поширення тріщини. При цьому приймаємо, що за дії довготривалих навантажень розтягу пластини напружено-деформований стан симетричний відносно лінії розміщення тріщини і характеризується коефіцієнтом інтенсивності напружень  $K_1$ . Задача полягає у визначенні періоду  $t = t_*$  докритичного росту тріщини (залишкової довговічності) в пластині.



Рисунок 2.1. Схема навантаження пластини з прямолінійною тріщиною.

Розв'язок даної задачі наведено в праці [6], де побудовано відповідні математичні рівняння, що описують ріст тріщини. На основі цих математичних співвідношень можна розв'язувати задачі про визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій з корозійно-механічними тріщинами. З огляду на це, викладемо основну суть цієї моделі [6].

Як відомо з літератури, при сповільненому руйнуванні, яке якраз відбувається за дії силового навантаження і корозійного середовища тріщина

поширюється стрибкоподібно. З огляду на це, для побудови кінетичного рівняння росту тріщи автори праці [6] для одного стрибка тріщини записують енергетичний баланс процесу

$$A = W + \Gamma , \qquad (2.1)$$

де *А* – робота зовнішніх сил; *w* – енергія деформування пластини; г – енергія руйнування пластини, яка залежить від довжини тріщини, часу і корозійного середовища. Оскільки виконується рівняння енергетичного балансу (2.1), то виконуватиметься рівняння балансу швидкостей зміни енергії, тобто [6]

$$dA / dt = dW / dt + d\Gamma / dt.$$
(2.2)

Енергію деформування записують так:

$$W = W_s + W_p(l), (2.3)$$

де  $W_s$  – пружна складова w;  $W_p(l)$  – частина енергії пластичного деформування, що залежить від довжини тріщини l.

Ураховуючи, що компоненти енергії деформування і руйнування – складні функції від l і t, а довжина неявно залежить від часу t, і підставляючи співвідношення (2.3) в (2.2) та вважаючи, що dA/dt = 0, отримують [6]

$$\frac{\partial}{\partial l} \left[ \Gamma - \left( A - W_s - W_p \right) \right] \frac{dl}{dt} + \left[ \frac{d\Gamma}{dt} \right]_{t = \Delta t_c} = 0, \qquad (2.4)$$

де  $t = \Delta t_c$  – час стрибка тріщини;  $\frac{\partial}{\partial l} [\Gamma - (A - W_s - W_p)] = \gamma_c - \gamma_t$ ,  $\gamma_t = \sigma_t \delta_t$  – усереднене значення роботи пластичних деформацій в зоні передруйнування;  $\gamma_c = \sigma_t \delta_{cc}$  – її критичне значення,  $\sigma_t$  – усереднені нормальні напруження в зоні передруйнування,  $\delta_t$  – розкриття у вершині тріщини,  $\delta_{cc} = \delta_c - A_i C_H (\Delta t)$  – його критичне значення за корозійного руйнування,  $\delta_c$  – критичне значення  $\delta_t$  без корозії,  $A_1$  – константа, яку визначають із експерименту,  $C_H$  – концентрація водню в зоні передруйнування.

З рівності (2.4) записують [6] швидкість поширення корозійно-механічної тріщини:

$$V = \frac{dl}{dt} = -\left[\frac{d\Gamma}{dt}\right]_{t=\Delta t_c} / (\gamma_c - \gamma_t).$$
(2.5)

Для визначення періоду докритичного росту тріщини до рівняння (2.5) додають початкову і кінцеву умови [6]:

$$t = 0, \quad l(0) = l_0, \quad t = t_*, \quad l(t_*) = l_*, \quad \gamma_t(l_*) = \gamma_C, \quad (2.6)$$

де *l*<sub>0</sub>, *l*<sub>\*</sub> – початкова і гранична довжина тріщини, відповідно.

Невідому енергію г руйнування у рівнянні (2.5) визначають так [6]

$$\Gamma = \Delta l \sigma_t \delta_{CC} \,. \tag{2.7}$$

Тут  $\Delta l$  – довжина елементарного стрибка тріщини, яку подають як суму елементарного поширення тріщини  $l_a$  за рахунок анодного розчинення і механічного стрибка  $l_m$  внаслідок механічного навантаження і наводнювання за електрохімічної корозії, тобто

$$\Delta l_C = l_a + l_m, \tag{2.8}$$

$$l_m = \alpha(\delta_t - \xi), \quad l_a = Fm^{-1}n^{-1} \int_{0}^{\Delta t} i(t)dt , \qquad (2.9)$$

де F – число Фарадея; m – грам-еквівалентна вага металу; n – валентність металу;  $\alpha$ ,  $\xi$  – експериментально встановлені константи матеріали; i(t) – густина анодного струму на поверхні вершини тріщини.

Далі розглядається випадок коли швидкість анодного розчинення набагато менша від швидкості механічного росту тріщини. Тоді енергію руйнування г(t) можна записати так

$$\Gamma = \sigma_t \alpha (\delta_t - \xi) [\delta_C - A_1 C_H(t)]. \qquad (2.10)$$

На основі [7], зміну концентрації водню  $C_{\rm H}(\Delta t)$  з часом в зоні передруйнування для відносно великих часів можна представити так

$$C_{\rm H}(\Delta t) \approx B \Delta t_c i_{\rm max},$$
 (2.11)

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

Для визначення часу  $\Delta t_C$  – інкубаційного періоду підготовки елементарного стрибка тріщини вважаємо, що тріщина почне поширюватися, коли максимальне розкриття в зоні передруйнування  $\delta_i(0, C_{\rm H})$  досягне критичного значення  $\delta_{CC}$ . Тоді, на основі вище наведеного та співвідношення (2.11) отримаємо рівняння:

$$\delta_{\rm C} - \delta_t = A_1 B \Delta t_C i_{\rm max}. \tag{2.12}$$

З рівняння (2.12) знайдемо час  $\Delta t_C$ 

$$\Delta t_{c} = i_{\max}^{-1} (A_{1}B)^{-1} [\delta_{c} - \delta_{t}].$$
(2.13)

Оскільки величина стрибка довжини тріщини  $\Delta l$  достатньо мала, то, очевидно, на такій малій віддалі від вершини тріщини  $\delta_t(x)$  змінюється незначно і її наближено по *x* можна вважати константою, тобто  $\delta_t(x) \approx \delta_t(0)$ . Таким чином, на основі (2.10)–(2.13), коли  $\xi = \delta_{scc}$  рівняння (2.5) набуде вигляду

$$\frac{dl}{dt} = \alpha_1 \frac{\delta_t - \delta_{scc}}{\delta_{cc} - \delta_t}$$
(2.14)

з початковою і кінцевою умовами

$$t = 0, \quad l(0) = l_0, \quad t = t_*, \quad l(t_*) = l_*, \quad \delta_t(l_*) = \delta_c.$$
 (2.15)

Тут  $\delta_{scc}$  – нижнє порогове значення розкриття  $\delta_t$  за якого тріщина не поширюється;  $\alpha_1$  – константа, яку визначають із експерименту.

## РОЗДІЛ З. ЗАЛИШКОВА МІЦНІСТЬ ПЛАСТИНИ, ЯКА ПОСЛАБЛЕНА ДВОМА БОКОВИМИ ТРІЩИНАМИ В УМОВАХ КОРОЗИВНОГО СЕРЕДОВИЩА

Розглядається пластина, яка послаблена двома боковими тріщинами (див. puc. 3.1). Вважається, що пластина на нескінченності розтягується рівномірно poзподіленими зусиллями інтенсивності p, направленими перпендикулярно до лінії розміщення тріщин. Водночас пластина контактує із корозивним середовищем, яке заповнює тріщини і сприяє їх поширенню. Задача полягає у знаходження часу протягом якого тріщина розвиватиметься в навантаженій пластині як корозійно-механічна і досягне свого граничного розміру. При цьому досягнення тріщиною свого граничного розміру призведе до руйнування пластини. Цей час визначатиме залишкову довговічність пластини.



Рисунок 3.1. Схема навантаження пластини з двома боковими тріщинами.

Для того щоб визначити залишкову довговічність пластини застосуємо математичну модель (2.14), (2.15). У рівняння (2.14) входить невідома величини  $\delta_t$  – розкриття у вершині тріщини. Для визначення цього деформаційного параметра скористаємося формулою, яка запропонована у праці [8]

$$\delta_t = \frac{K_1^2}{\sigma_t E(1 - \lambda^2)},\tag{3.1}$$

де E – модуль пружності;

ν – коефіцієнт Пуассона;

 $\lambda$  – відносний локальний рівень навантаження торсіона  $\lambda = p / \sigma_t$ ;

*p* – усереднене регулярне напруження в зоні передруйнування біля контура тріщини;

σ<sub>t</sub> – усереднені пластичні напруження в зоні передруйнування біля контура тріщини;

К<sub>1</sub> – коефіцієнт інтенсивності напружень.

*K<sub>1</sub>* – коефіцієнт інтенсивності напружень біля вершини тріщини, визначаємо для даної пластини з боковими тріщинами наближено, використовуючи відомий [9] метод граничної інтерполяції. Згідно цього методу *K<sub>1</sub>* можна представити так

$$K_I = \sigma \alpha, \tag{3.2}$$

де  $\sigma$  і  $\alpha$  - відповідно силова і геометрична частини  $K_{I}$ .

Розглянемо граничні випадки цієї задачі, коли параметр  $\eta = bL^{-1}$  прямує до нуля — нескінченно мала тріщина і до одиниці — тріщина перерізає майже всю смугу. Для першого випадку [9]

$$K_{\rm Imax}^{(0)} = \sigma_0 \alpha^{(0)}, \tag{3.3}$$

де  $\sigma_0 = p, \alpha^{(0)} = 1,1215\sqrt{\pi b}.$ 

Для другого випадку [9]

P P P 2 P

$$K_{\text{Imax}}^{(1)} = \sigma_1 \alpha^{(1)}, \qquad (3.4)$$

Here 
$$G_1 = \frac{1}{2(L-b)}, P = 2pL, \alpha^{(1)} = \frac{1}{\sqrt{\pi}}.$$

Тут *b* – глибина тріщин; *L* – півширина пластини.

Згідно [9] величини  $\sigma$ ,  $\alpha$  будуть визначатися через  $\alpha^{(0)}, \alpha^{(1)}, \sigma_0, \sigma_1$  наступним чином

$$\alpha = \frac{\alpha^{(0)} \alpha^{(1)}}{\sqrt{(\alpha^{(0)})^2 + (\alpha^{(1)})^2}},$$
(3.5)

$$\sigma = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_1^2 - (\sigma_1)_{\eta=0}^2} .$$
 (3.6)

Підставляючи (3.3), (3.4) в (3.5) і (3.6), для наближеного визначення σ і α отримаємо такі формули:

$$\alpha = \frac{\alpha^{(0)}\alpha^{(1)}}{\sqrt{(\alpha^{(0)})^2 + (\alpha^{(1)})^2}} = \frac{1.1215\sqrt{\pi b} \cdot \frac{2\sqrt{L-b}}{\sqrt{\pi}}}{\left(\sqrt{1.1215\sqrt{\pi b}}\right)^2 + \left(\frac{2\sqrt{L-b}}{\sqrt{\pi}}\right)^2} = \frac{2.243\sqrt{b}\sqrt{L-b}}{\sqrt{\frac{1.1215^2\pi^2 b + 4(L-b)}{\pi}}} = \frac{2.243\sqrt{b}\sqrt{L-b}\sqrt{\pi}}{\sqrt{1.2577\pi^2 b + 4(L-b)}} (3.7)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_1^2 - (\sigma_1)_{\eta=0}^2} = \sqrt{p^2 + \left(\frac{2pL}{2(L-b)}\right)^2 - \left(\frac{2pL}{2L}\right)^2} = \sqrt{p^2 + \left(\frac{2pL}{2(L-b)}\right)^2 - p^2} = \frac{2pL}{2(L-b)} = \frac{pL}{L-b} (3.8)$$

Отримані формули (3.6) та (3.7) ми підставляємо у (3.1) для визначення наближеного значення КІН біля вершини тріщини:

$$K_{\rm I} = \frac{2.243pL\sqrt{b}\sqrt{L-b}\sqrt{\pi}}{(L-b)\sqrt{1.2577\pi^2b+4(L-b)}}$$
(3.9)

Підставляючи співвідношення (3.8) у формулу (3.1), яку підставивши в рівняння (2.14) і інтегруючи його за умов (2.15) отримаємо формулу для визначення залишкового ресурсу пластини. Щоб виконати числовий розрахунок задачі приймаємо, що пластина виготовлена зі сталі 45ХН2МФА, для якої в праці [10] наведено характеристики матеріалу:

дистильована вода –  $\alpha_1 = 8,2 \cdot 10^{-8}$  м/с,  $\delta_{cc} = 7,5 \cdot 10^{-6}$  м,  $\delta_{scc} = 2,439 \cdot 10^{-7}$  м;  $\sigma_t = 1660$  МПа;  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа,  $\nu = 0,3$ , L = 0,02 м.

Далі на основі деформаційного критерію критичного розкриття тріщини і формул (3.1), (3.9) знаходимо граничну довжину тріщини в пластині за дії розтягуючих зусиль *p* = 190 МПа:

$$b_* = 0,00914$$
 M.

Розв'язавши математичну задачу (2.14), (2.15) для визначення залишкової довговічності пластини отримали наступне співвідношення

$$t_* = \frac{1}{\alpha_1} \int_{b_0}^{0.00914} \frac{7.5 \cdot 10^{-6} - \delta_t}{\delta_t - 2.439 \cdot 10^{-7}} db$$
(3.10)

Далі підставимо формулу (3.1) в співвідношення (3.10). За співвідношення (3.10) на рис. 3.2 побудовано залежність залишкової довговічності пластини від початкового розміру тріщини





Як видно з графіку (рис. 3.2), залишкова довговічність пластини суттєво залежить від початкового розміру дефекту. Збільшення початкової довжини тріщин призводить до зменшення залишкової довговічності.

#### ВИСНОВОК

Побудовано розрахункову модель для визначення залишкової довговічності пластини з двома боковими тріщинами, яка контактує з корозивним середовищем і піддана тривалому розтягу.

Застосовуючи відомий в літературі метод граничної інтерполяції побудовано формулу для визначення коефіцієнта інтенсивності напружень у вершині тріщин в пластині.

Показано, що збільшення початкової довжини тріщини зменшує період докритичного її росту – залишковий ресурс пластини зі сталі 45ХН2МФА.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Похмурский В.И. Корозійна втома металів і сплавів / В.И. Похмурский, М.С.Хома. – Львів: Сполом, 2008. – 299 с.
- Назарчук З.Т. акустико-емісійне діагностування корозійно-водневого розтріскування конструкційних сталей / З.Т. Назарчук, В.Р. Скальський, Т.В. Селівончик. – Київ: Наукова думка, 2019. – 256 с.
- Atkinson J.D. Effect of stress wave form and holding time on environmentally assisted fatigue crack propagation in C-Mn structural steel / J.D. Atkinson, T.S. Lindley // Metal Science. – 1979. – Vol. 13. – P. 444–449.
- Андрейків О.Є. Розрахунок залишкової довговічності тривало експлуатованої ділянки магістрального газопроводу / О.Є. Андрейків, О.В. Гембара, О.Т. Цирульник, Л.І. Ниркова // Фізико-хімічна механіка матеріалів. –2012. – № 2. – Р. 103–110.
- Romaniv O.N. Inhibitor protection of high-strength steels from corrosion cracking in the stage of crack propagation / O.N. Romaniv, G.N. Nikiforchin, A.T. Tsirul'nik // Soviet Materials Science. – 1981. – 17(1). – P. 42–49.
- Звягін Н. Аналог задачі Гріффітса для поширення корозійно-механічних тріщин / Н. Звягін, С. Настасяк, В. Колодій, Ю. Колодій // Вісник Львівського університету. Серія мех.-мат. – 2021. – С. 111–117.
- Andreikiv O.E. Electrochemical model of local corrosion at the tip of a loaded crack / O.E. Andreikiv, N.I. Tym'yak // Materials Science. – 1995. – 30, № 19. – P. 19–24.
- Yadzhak N. Generalization of the equivalent area method for the case of short fatigue cracks in a three-dimensional body / N. Yadzhak // Visnyk of the Lviv University // Series Mechanics and Mathematics. 2020. № 89. C. 134–141.
- Андрейків О. Є. Методи оцінювання залишкової міцності та довговічності елементів конструкцій за даними неруйнівного контролю /

О. Є. Андрейків, В. М. Пустовий, Д. В. Рудавський, І. Я. Долінська, П. О. Семенов. – Львів: Видавництво "Простір-М", 2017. – 460 с.

 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.