

УДК 620.191.33

МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ ТА РИЗИКУ РУЙНУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ З ТРІЩИНОПОДІБНИМИ ДЕФЕКТАМИ

В. В. ПАНАСЮК¹, І. М. ДМИТРАХ¹, Л. ТОГ², О. Л. БІЛИЙ¹, А. М. СИРОТЮК¹

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Інститут логістики і виробничих систем Фундації Бая Золтана, Мішкольц, Угорщина

Запропоновано метод оцінювання міцності та ризику руйнування дефектних елементів конструкцій на основі показника “опірності елемента конструкції росту тріщини”, який є характеристикою швидкості зміни коефіцієнта інтенсивності напружень біля вершини тріщини під час її росту в такому елементі. Наведено приклади оцінювання робоздатності та довговічності типових елементів конструкцій з тріщиноподібними дефектами різних форми та розташування під дією квазістатичних та циклічних навантажень.

Ключові слова: елементи конструкцій; тріщиноподібні дефекти; коефіцієнт інтенсивності напружень; показник опірності елемента конструкції росту тріщини; пороговий і критичний розміри тріщини; статичне і циклічне навантаження; довговічність.

Проблема техногенної та екологічної безпеки відповідальних об’єктів індустріальної інфраструктури стає все актуальнішою не тільки для багатьох економічно розвинутих країн світу, а й для України. Технічна діагностика та досвід експлуатації відповідальних конструкцій і технологічного обладнання засвідчують, що в таких об’єктах зростає кількість т. зв. нетрадиційних пошкоджень, які не прогнозують нормативні інструкції та документи і утворюються внаслідок тривалості роботи устаткування або різноманітних відхилень від експлуатаційних режимів [1]. Такі пошкодження здебільш мають корозійно-механічну природу і виникають, в першу чергу, в місцях підвищеної концентрації напружень внаслідок конструктивних особливостей або технології виготовлення деталі чи вузла.

Власне в цих місцях інженерною практикою зафіксовано [2–5] основні поломки та руйнування конструктивних елементів у різних галузях промисловості (рис. 1). При цьому за фізичною природою таке руйнування є багатостадійним локалізованим процесом зародження та розвитку тріщиноподібних дефектів (гострокінцевих концентраторів напружень) до критичних розмірів [6]. Тут визначальне значення мають фізико-хімічні чинники локальної взаємодії напруженого металу та робочого середовища, які принципово змінюють кінетику пошкоджувальності матеріалу та суттєво пришвидшують його руйнування [7]. Однак біля всіх концентраторів напружень локалізуються фізико-механічні та фізико-хімічні процеси руйнування матеріалів. Тому корозійно-механічну пошкоджуваність та руйнування матеріалу біля концентраторів напружень різних типів можна оцінювати на основі спільного методологічного підходу. Таким науковим інструментарієм є механіка руйнування матеріалів та конструкцій, що вивчає закономірності зародження і розвитку неоднорідностей і дефектів типу тріщин під статичними і циклічними навантаженнями [8].

Контактна особа: І. М. ДМИТРАХ, e-mail: dmtr@ipm.lviv.ua

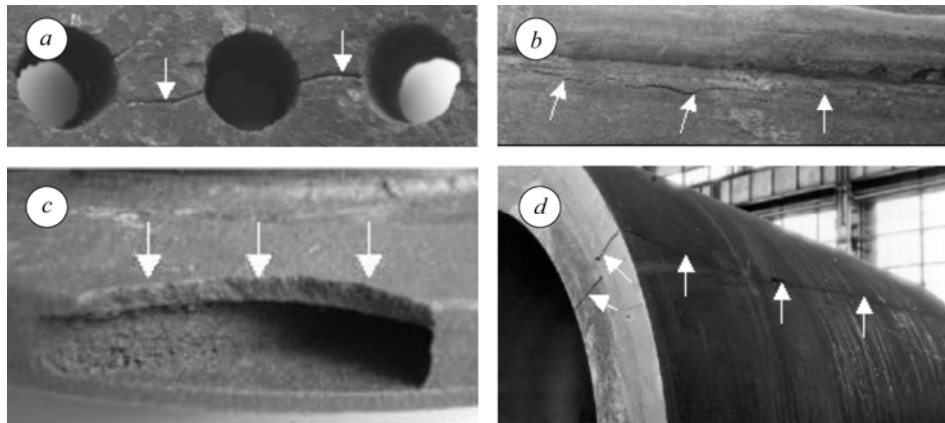


Рис. 1. Типові експлуатаційні пошкодження та дефекти в елементах конструкцій тривалої експлуатації: *a* – корозійно-механічні тріщини між отворами для присіднання патрубків у колекторі пароперегрівача енергоблока ТЕС [2]; *b* – корозійне розтріскування двшовної зварної труби зі сталі X70 магістрального газопроводу [3]; *c* – пошкодження робочих коліс відцентрових насосних агрегатів хімічного устаткування, спричинене тріщиноутворенням [4]; *d* – тріщини в бандажі вальцювального валка сталепрокатного устаткування [5].

Fig. 1. Typical in-service damages and defects in elements of long-term operation structures: *a* – corrosive-mechanical cracks between holes for joining the nipples in a header of superheater of the thermal power plant unit [2]; *b* – corrosion cracking of the double welded pipe made of X70 steel of the main gas pipeline [3]; *c* – damaging of working wheels of rotary pumps of chemical equipment caused by cracking [4]; *d* – cracks in the roll sleeve of steel-rolling equipment [5].

Розвиваючи розроблені раніше методи [7, 9–11], що ґрунтуються на використанні інваріантних (однозначних) діаграм корозійної тріщиностійкості матеріалів, а також критеріїв порогового та критичного розмірів дефектів, пропонуємо новий критерій оцінювання міцності та надійності елементів конструкцій із тріщиноподібними дефектами за показником “опірності елемента конструкції росту тріщини” [12], який є характеристикою швидкості зміни коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) K_I біля вершини тріщини довжиною a під час її росту у цьому елементі:

$$\lambda = \frac{dK_I}{da} . \quad (1)$$

Побудовано (рис. 2) загальну схему визначення показника λ для квазістатично навантаженого елемента конструкції. Тут на залежності $dK_I/da = F(a)$ існує деяке значення розміру дефекту a_* , починаючи з якого різко зростає швидкість зміни КІН K_I . Це значення пропонуємо вважати характеристичним для оцінювання міцності та надійності елементів конструкцій із тріщиноподібними дефектами. Таким чином, за зміною параметра λ залежно від геометрії конструктивного елемента та способу його навантаження, форми та розташування тріщиноподібного дефекту можна порівняльно оцінювати ризик руйнування конструкції чи їх компонентів, а також формулювати вимоги до процедури їх технічної діагностики під час експлуатації.

Наприклад, якщо маємо два різні за геометрією конструктивні елементи, що виготовлені із однакового матеріалу і знаходяться в однакових експлуатаційних умовах, то за заданої надійності визначення критичного значення K_{IC} внаслідок різного характеру зміни КІН з довжиною тріщини, необхідна надійність у вимірюванні критичної довжини тріщини a_c різна (рис. 3а).

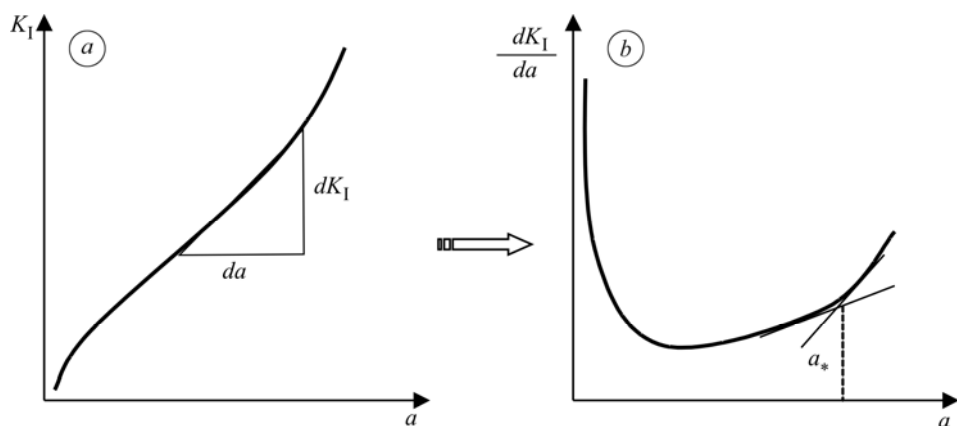


Рис. 2. Схема визначення показника опірності елемента конструкції росту тріщини за квазістатичного навантаження.

Fig. 2. Scheme of determination of the index of structural element crack growth resistance under quasi-static loading.

Якщо маємо два однакові за геометрією конструктивні елементи, що виготовлені із однакового матеріалу і знаходяться в однакових експлуатаційних умовах, але містять різні за формою чи розташуванням тріщиноподібні дефекти, то можна оцінити небезпечність дефекту щодо руйнування (рис. 3b). Аналогічно можна спрогнозувати довговічність та ризик руйнування конструктивних елементів, виготовлених із різних матеріалів, що знаходяться в різних умовах навантаження чи під дією різних робочих середовищ тощо.

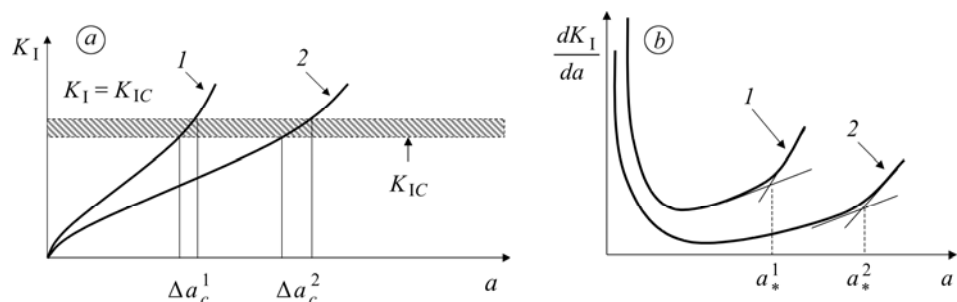


Рис. 3. Визначення необхідної надійності під час вимірювання критичної довжини тріщини a_c для різних елементів конструкції (a: криві 1 і 2) та порівняльна оцінка небезпеки різних тріщиноподібних дефектів (b: криві 1 і 2) в однакових за формою конструктивних елементах, що виготовлені із однакового матеріалу і знаходяться в однакових експлуатаційних умовах.

Fig. 3. Determination of required reliability when measuring critical crack length a_c for different structural elements (a: curves 1 and 2) and comparative assessment of the danger of different crack-like defects (b: curves 1 and 2) in structural component of the same shape, manufactured from the same material and subjected to the same operation conditions.

Процедура визначення параметра a^* така. Для кожного розглянутого конструктивного елемента із тріщиноподібним дефектом заданих форми і розташування будують відповідні безрозмірні залежності типу:

$$\frac{\sqrt{t}}{\sigma} \cdot \frac{dK_I}{da} = F\left(\frac{a}{t}\right), \quad (2)$$

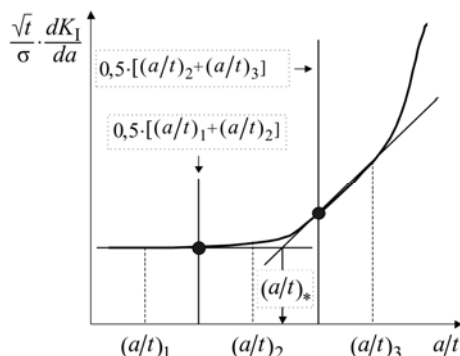
де t – розмір конструктивного елемента в напрямку поширення тріщини; σ – параметр прикладеного зовнішнього навантаження.

Такі залежності мають деяку особливість. На них завжди існує значення розміру дефекту $(a/t)_*$, починаючи з якого різко зростає швидкість зміни КІН K_I . Це значення визначали так (рис. 4). З кроком $a/t = 0,01$ підраховували поточні значення $dK_I/da = F(a/t)$. При цьому визначали три характерні точки $(aK_I/da)_1$, $(aK_I/da)_2$, $(aK_I/da)_3$, в околі яких виконувались умови

$$\begin{aligned} (dK_I/da)_{i+1} - (dK_I/da)_i &= 0,01; \\ (dK_I/da)_{i+1} - (dK_I/da)_i &= 0,1; \\ (dK_I/da)_{i+1} - (dK_I/da)_i &= 1. \end{aligned} \quad (3)$$

Рис. 4. Загальна схема визначення характеристичного розміру тріщиноподібного дефекту $(a/t)_*$.

Fig. 4. General scheme for determination of characteristic crack-like defect size $(a/t)_*$.



Аргументи цих точок позначали як $(a/t)_1$, $(a/t)_2$ та $(a/t)_3$. Далі у точках з аргументами $0,5 \cdot [(a/t)_1 + (a/t)_2]$ та $0,5 \cdot [(a/t)_2 + (a/t)_3]$ проводили дотичні до залежності $dK_I/da = F(a/t)$. Точку перетину цих дотичних приймали за $(a/t)_*$. Дефект, для якого значення $(a/t)_*$ було найменшим, вважали найнебезпечнішим щодо ризику руйнування конструктивного елемента.

На цій підставі залежно від геометрії конструктивного елемента, способу його навантаження, форми та розташування тріщиноподібних дефектів можна порівняльно оцінити їх небезпечність та ризику руйнування типових елементів конструкцій: пластини, плити, стрижнів, балки, циліндричних оболонок (труби), а також у конструктивних елементах з отворами.

Розглянемо такі приклади оцінки міцності та ризику руйнування типових конструктивних елементів під статичними навантаженнями за характеристичним параметром $(a/t)_*$. Для різних за формою та розташуванням тріщиноподібних дефектів у плиті, що навантажена напруженнями розтягу σ перпендикулярно до площини тріщин, оцінювання міцності за параметром $(a/t)_*$ свідчить про таке. З лінійних тріщин найнебезпечніша зовнішня крайова (рис. 5a і табл. 1). З тріщин еліптичної форми у плиті, навантаженої напруженнями розтягу перпендикулярно до площини тріщини (рис. 5b і табл. 1), найкритичнішою є чвертьеліптична кутова.

Таблиця 1. Характеристичні значення параметра $(a/t)_*$ для плити з різними за формою та розташуванням тріщинами під навантаженням напруженнями розтягу σ перпендикулярно до площини тріщини

Конструктивний елемент – плита	$(a/t)_*$
Із центральною поздовжньою тріщиною	0,703
Із зовнішньою крайовою тріщиною	0,429
Із двома зовнішніми крайовими тріщинами	0,736
Із півеліптичною крайовою тріщиною	0,769
Із чвертьеліптичною кутовою тріщиною	0,515
Із внутрішньою еліптичною центральною тріщиною	0,747

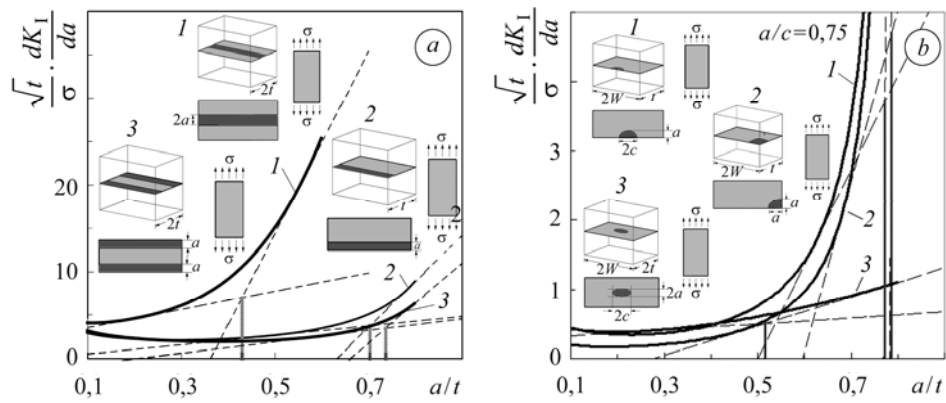


Рис. 5. Порівняльна оцінка небезпеки різних за формою та розташуванням лінійних (а) та еліптичних (b) тріщиноподібних дефектів у плиті, навантаженій напруженнями розтягу σ перпендикулярно до площини тріщини (а: 1 – центральна поздовжня тріщина; 2 – зовнішня крайова; 3 – дві зовнішні крайові; b: 1 – півеліптична крайова; 2 – чвертьеліптична кутова; 3 – внутрішня еліптична центральна).

Fig. 5. Comparative assessment of the danger of linear (a) and elliptical (b) crack-like defects of different shape and location in a plate loaded by tensile stresses σ perpendicular to the crack plane (a: 1 – central longitudinal crack; 2 – external surface; 3 – two external surface cracks; b: 1 – semi-elliptical surface; 2 – quarter-elliptical edge; 3 – embedded elliptical).

Для круглих стрижнів з тріщинами, що знаходяться під дією одновісного розтягу, найнебезпечніша кільцева тріщина, коли значення характеристичного параметра $(a/2r)_*$ є мінімальним (рис. 6 і табл. 2).

Таблиця 2. Характеристичні значення параметра $(a/2r)_*$ для круглих стрижнів з різними за формою та розташуванням тріщинами за розтягу

Конструктивний елемент – круглий стрижень	$(a/2r)_*$
Із прямою фронтальною тріщиною	0,380
Із кутовою фронтальною тріщиною	0,364
Із кільцевою тріщиною	0,285

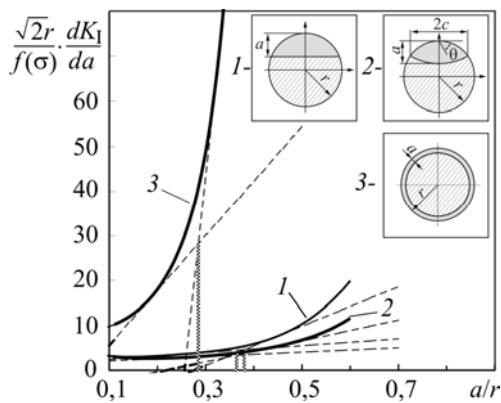


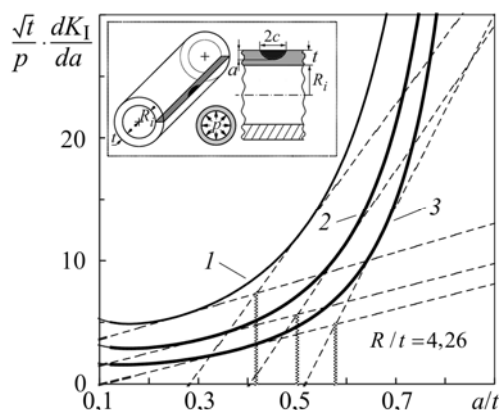
Рис. 6. Порівняльна оцінка небезпеки різних за формою та розташуванням тріщиноподібних дефектів у круглих стрижнях за розтягу: 1 – стрижень з прямою фронтальною тріщиною; 2, 3 – з кутовою фронтальною і кільцевою тріщинами.

Fig. 6. Comparative assessment of the danger of crack-like defects of different shape and location in rounded bars under tension: 1 – bar with a straight front crack; 2, 3 – with the edge front and circumferential cracks.

У трубах із зовнішніми осьовими півеліптичними тріщинами зі зменшенням відношення (a/c) значення характеристичного параметра $(a/t)_*$ знижується, що свідчить про падіння міцності (рис. 7 і табл. 3). Тобто продовгуваті півеліптичні тріщини небезпечніші.

Рис. 7. Порівняльна оцінка небезпеки зовнішніх осьових півеліптичних тріщиноподібних дефектів різної форми (a/t) у стінці трубопроводу, що знаходиться під дією внутрішнього тиску: 1 – $a/c = 0,25$; 2 – $0,5$; 3 – $0,75$.

Fig. 7. Comparative assessment of the danger of external longitudinal semi-elliptical crack-like defects of different shape (a/t) in the pipeline wall under internal pressure: 1 – $a/c = 0.25$; 2 – 0.5 ; 3 – 0.75 .



Таблиця 3. Характеристичні значення параметра $(a/t)_*$ для труби з дефектом на зовнішній поверхні під дією внутрішнього тиску

Конструктивний елемент – труба	a/c	$(a/t)_*$
З осьовою півеліптичною тріщиною на зовнішній поверхні	0,25	0,417
	0,50	0,501
	0,75	0,578

Порівняння трьох характерних типів дефектів у стінці труби під дією внутрішнього тиску, зокрема осьової, кільцевої і еліптичної тріщин, свідчить (рис. 8 і табл. 4), що зовнішня осьова півеліптична тріщина значно небезпечніша проти інших. Тут значення характеристичного параметра $(a/t)_*$ дуже низьке, тобто всі дефекти такого типу, якщо $(a/t)_* \geq 0,199$, є потенційно небезпечні щодо ризику руйнування.

Таблиця 4. Характеристичні значення параметра $(a/t)_*$ для трубопроводу з тріщинами під дією внутрішнього тиску

Конструктивний елемент – труба	$(a/t)_*$
З осьовою півеліптичною тріщиною на зовнішній поверхні	0,578
З осьовою еліптичною тріщиною у стінці	0,199
З кільцевою еліптичною тріщиною у стінці	0,646

За наведеними вище результатами можна також оцінити залишкову довговічність дефектних елементів конструкцій під циклічними навантаженнями у робочих середовищах. При цьому характеристичне значення розміру дефекту a_* вибирають як граничне і підраховують залишкову довговічність N_* дефектного елемента конструкції, тобто:

$$N_* = \int_{a_{th}}^{a_*} \frac{da}{F(\Delta K_I)}, \quad (4)$$

де a_{th} – пороговий розмір тріщини; $F(\Delta K_I)$ – відома функція КІН ΔK_I , яка описує швидкість росту втомної тріщини в даному матеріалі, коли задані умови випробування [6, 8]. Аналітичні співвідношення для підрахунку КІН K_I біля вершини тріщини у типових конструктивних елементах (плити, стрижні, труби, конструктивні елементи з отворами тощо) наведені раніше [13–15].

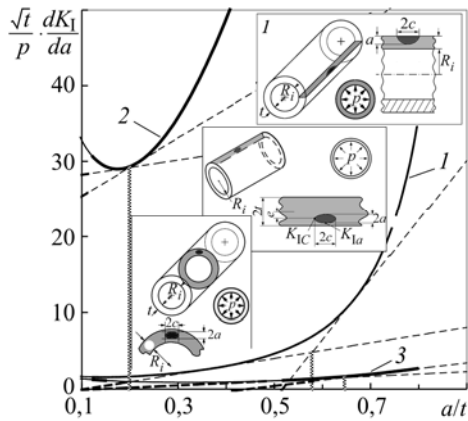


Рис. 8. Порівняльна оцінка небезпеки осьової поздовжньої півеліптичної тріщини на зовнішній поверхні трубопроводу (1) та осьової (2) і кільцевої (3) еліптичних тріщин у стінці труби під дією внутрішнього тиску.

Fig. 8. Comparative assessment of the danger of longitudinal semi-elliptical crack on external surface of pipeline (1) and axial (2) and circumferential (3) embedded elliptical cracks in the pipeline wall under internal pressure.

Для порівняння та аналізу результатів також розраховують залишкову довговічність за відомою формулою [8], яка передбачає досягнення умов спонтанного (катастрофічного) руйнування конструктивного елемента:

$$N_{fc} = \int_{a_{th}}^{a_{fc}} \frac{da}{F(\Delta K_I)}, \quad (5)$$

де N_{fc} – кількість циклів навантаження до руйнування конструктивного елемента; a_{fc} – критичний розмір тріщини, що відповідає досягненню умови $\Delta K_I = \Delta K_{fc}$ [8].

Слід зазначити, що значення a_* залежить тільки від геометрії конструктивного елемента, способу його навантаження, а також форми та розташування тріщиноподібного дефекту, а a_{fc} – від тих самих чинників, а також від властивостей та умов його випробування. Тому, коли досліджують конкретні конструктивні елементи, виготовлені із заданого матеріалу і які знаходяться у визначених експлуатаційних умовах (середовище заданого складу, температура, тип навантаження тощо), значення параметра a_* може формально бути меншим або більшим, ніж критичний розмір дефекту a_{fc} .

Формальний випадок, коли $a_{fc} \leq a_*$, сприятливіший для забезпечення надійної роботи елемента конструкції, оскільки потенційний розвиток тріщиноподібного дефекту буде стабільнішим і прогнозованим.

Випадок, коли $a_{fc} \geq a_*$, найнебезпечніший через ризик спонтанного (катастрофічного) руйнування конструктивного елемента, так як під час підростання дефекту різко підвищується швидкість зміни КІН K_I , що може спричинити різке та мало прогнозоване зростання швидкості росту тріщини. Тому тут залишкову довговічність дефектного елемента конструкції слід оцінювати за величиною N_* .

Наведемо приклад оцінювання довговічності трубопровідних систем тривалої експлуатації, що є важливою проблемою для інженерної практики [16]. Розглянемо актуальний випадок, пов'язаний із транспортуванням водневомісних середовищ. Відомо [17], що тривала експлуатація таких трубопроводів сприяє наводнюванню металу труб, що призводить до деградації його фізико-механіч-

них властивостей внаслідок водневого окрихнення [18]. Окрім цього, експлуатаційні тріщиноподібні дефекти суттєво знижують довговічність трубопроводу та підвищують ризик руйнування.

Таблиця 5. Дані для розрахунку довговічності прямої ділянки трубопроводу (526×50 mm) зі сталі 16ГС з півеліптичною тріщиною на зовнішній поверхні під дією внутрішнього тиску 10,5 МПа

Схема дефектної труби

Форма дефекту	$C_{H(v)}$, ppm	a_{th}	a_*	a_{fc}	$N_* \times 10^3$	$N_{fc} \times 10^3$
		mm			cycle	
$a/c = 0,25$	1,97	10,38	20,85	24,20	260,67	266,58
	2,07	10,38	20,85	23,41	253,51	257,46
	2,20	11,56	20,85	22,62	213,77	216,01
	2,47	10,77	20,85	21,04	194,27	194,45
	2,68	10,77	20,85	20,65	–	183,22
$a/c = 0,5$	1,97	12,35	25,05	27,76	313,39	317,54
	2,07	12,75	25,05	26,97	268,07	270,62
	2,20	13,93	25,05	25,78	237,20	238,03
	2,47	13,14	25,05	24,60	–	205,65
	2,68	12,75	25,05	24,20	–	228,79
$a/c = 0,75$	1,97	14,72	28,90	30,92	345,29	348,02
	2,07	15,12	28,90	30,13	298,81	300,24
	2,20	16,70	28,90	28,94	238,52	238,56
	2,47	15,51	28,90	27,36	–	233,38
	2,68	15,51	28,90	27,36	–	233,38

Нижче подано розрахункові оцінки лінійних ділянок трубопроводу (зовнішній діаметр $D = 526$ mm, товщина стінки $t = 50$ mm), виготовленого зі сталі 16ГС [19], який знаходиться під дією внутрішнього тиску ($p = 10,5$ МПа) транспортного водневмісного середовища. Розглянуто п'ять різних станів металу трубопроводу, які відрізняються об'ємною концентрацією водню в металі $C_{H(v)}$: 1,97; 2,07; 2,20; 2,47 та 2,68 ppm [20]. Вважали, що трубопровід містить напівеліптичні тріщиноподібні дефекти на зовнішній поверхні. Результати розрахунків довговічності N_{fc} та N_* , а також необхідні для них значення параметрів a_{th} , a_* та a_{fc} наведено в табл. 5. Встановлено, що залишкова довговічність такого трубопроводу по-

мітно зменшується зі зростанням об'ємної концентрації водню в його металі, а також зі зміною співвідношення a/c , тобто продовгуватіші півеліптичні тріщини небезпечніші. Слід також відзначити, що цьому конструктивному елементу притаманна ситуація, коли $a_{fc} \geq a_*$, і залишкову довговічність дефектної труби слід оцінювати за величиною N_* . Проте тут є декілька випадків, коли $a_{fc} \leq a_*$, і залишкову довговічність для них визначатиме значення N_{fc} (табл. 5).

За розтягу ($\sigma = 50$ МПа) такого ж трубопроводу, але з кільцевою тріщиною на зовнішній поверхні труби розрахунки виявили таке (табл. 6). Тут також зберігається тенденція помітного зменшення довговічності зі зростанням об'ємної концентрації водню в металі трубопроводу. Окрім цього, значення a_* завжди менше, ніж a_{fc} . Тому тут слід очікувати можливе різке та мало прогнозоване зростання швидкості росту тріщини, спричинене різким підвищенням швидкості зміни КІН K_I . Через те залишкову довговічність дефектного елемента конструкції слід оцінювати за величиною N_* , яка є відчутно менша, ніж значення N_{fc} .

Таблиця 6. Дані для розрахунку довговічності прямої ділянки трубопроводу (526×50 mm) зі сталі 16ГС з кільцевою тріщиною на зовнішній поверхні за розтягу 50 МПа

Схема дефектної труби

$C_{H(v)}$, ppm	a_{th}	a_*	a_{fc}	$N_* \times 10^3$	$N_{fc} \times 10^3$
	mm			cycle	
1,97	10,79	25,80	36,27	472,20	503,01
2,07	11,28	25,80	34,80	415,13	439,11
2,20	13,24	25,80	32,84	360,55	378,70
2,47	11,77	25,80	30,88	334,68	343,58
2,68	11,28	25,80	30,39	361,54	369,31

На завершення слід зауважити, що такий підхід до оцінювання міцності та надійності елементів конструкцій із тріщиноподібними дефектами детально описані у довідниковому посібнику [21], який недавно вийшов з друку. Тут розглянуто найтипівіші елементи конструкцій (пластини, плити, стрижні, циліндричні оболонки тощо) з дефектами різних форми та розташування під дією квазістатичних та циклічних (втомних) навантажень. У довіднику також наведено приклади оцінювання залишкової довговічності та ризику руйнування пошкоджених елементів конструкцій із урахуванням експлуатаційних чинників (характеру навантаження, дії робочих середовищ, стану матеріалу тощо).

ВИСНОВКИ

Запропоновано метод оцінювання роботоздатності та ризику руйнування елементів конструкцій із тріщиноподібними дефектами за показником “опірності елемента конструкції росту тріщини”, який є характеристикою швидкості зміни коефіцієнта інтенсивності напружень з розвитком тріщини: $\lambda = dK_I / da$. Наведені приклади реалізації методу для деяких типових елементів конструкцій (плити, стрижні, труби) за умов їх квазістатичного навантаження та встановлені характеристичні значення розміру дефекту a_* , починаючи з якого різко зростає параметр λ , а відтак, і ризик руйнування конструктивного елемента. Оцінено ефективність застосування запропонованого параметра a_* для визначення залишкової довговічності дефектних елементів конструкцій за циклічних навантажень у робочих середовищах.

РЕЗЮМЕ. Предложен метод оценки прочности и риска разрушения дефектных элементов конструкций на основании показателя “сопротивления элемента конструкции росту трещины”, который является характеристикой скорости изменения коэффициента интенсивности напряжений возле вершины трещины во время ее роста в конструктивном элементе. Приведены примеры оценки работоспособности и долговечности типичных элементов конструкций с трещиноподобными дефектами различных формы и размещения при воздействии квазистатических и циклических нагрузок.

SUMMARY. The method for strength and fracture risk assessment of defected structural elements is proposed. It is based on the index “resistance of structural element to crack growth”, which is a characteristic of the stress intensity factor rate change at the crack tip during its propagation in the structural element. The examples of serviceability and durability assessment of the typical structural elements with defects of different shape and location under conditions of quasi-static and cyclic loadings are presented.

1. *Цільова комплексна програма наукових досліджень НАН України “Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин // 36. наук. статей за результатами, отриманими в 2010–2012 рр. / За заг. ред. Б. Є. Патона. – К.: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона, 2009. – 612 с.*
2. *Гладько В. Б., Собчак А. Р. Пошкоджувальність структури сталі колектора пароперегрівача за експлуатаційних умов // Вісник Терноп. нац. техн. ун-ту (механіка та матеріалознавство). – 2010. – 15, № 1. – С. 27–31.*
3. *Охрімчук С. О., Руденко С. М., Бабельський Р. М. Огляд можливих причин виникнення тріщин на двшовних трубах // Трубопровідний транспорт. – 2011. – № 4(70). – С. 23–25.*
4. *Закирничная М. М., Девятков А. Р. Оценка эксплуатационной долговечности рабочих колес центробежных насосных агрегатов // Нефтегазовое дело. – 2010. – http://www.ogbus.ru/authors/Zakirnichnaja/Zakirnichnaja_2.pdf.*
5. *Машиностроение. Энциклопедия: в 40-ка т. Т. IV-3: Надежность машин / В. В. Клюев, В. В. Болотин, Ф. Р. Соснин и др. / Под общ. ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003. – 592 с.*
6. *Панасюк В. В. Механика квазихрупкого разрушения материалов. – К.: Наук. думка, 1991. – 416 с.*
7. *Дмитрах І. М., Панасюк В. В. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка, 1999. – 341 с.*
8. *Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пос. в 4-х т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. – К.: Наук. думка, 1988–1990.*
9. *Панасюк В. В., Ратыч Л. В., Дмитрах И. Н. Определение базовых диаграмм циклической коррозионной трещиностойкости сталей с учетом экстремальных электрохимических условий в трещине // Докл. АН СССР. – 1986. – 266, № 5. – С. 1128–1131.*
10. *Дмитрах І. М. Проблеми оцінки роботоздатності та ризику руйнування елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування // Актуальні проблеми сучасного матеріалознавства. – К.: Академперіодика, 2008. – Т. 2. – С. 598–613.*

11. *Dmytrakh I. M.* Corrosion fatigue cracking and failure risk assessment of pipelines // Safety, Reliability and Risks Associated with Water, Oil and Gas Pipelines. – NATO Science for Peace and Security Series – C: Environmental Security. – The Netherlands: Springer, 2008. – P. 99–113.
12. *Toth L.* Crack propagation sensitivity index as the tool to promote the fracture mechanics concepts // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2001. – 37, № 2. – С. 63–68.
(*Toth L.* Crack-propagation sensitivity index as a tool to promote concepts of fracture mechanics // Materials Science. – 2001. – 37, № 2. – P. 210–218.)
13. *Sih G. C.* Handbook of Stress Intensity Factor. – Pennsylvania: Lehigh Univ., 1973. – 630 p.
14. *Stress Intensity Factors Handbook*: In 2 vol. / Ed. by Y. Murakami. – Oxford: Pergamon press, 1987. – 1456 p.
15. *Саврук М. П.* Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами // Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пос. в 4-х т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. – К.: Наук. думка, 1988. – Т. 2. – 618 с.
16. *Проблеми міцності матеріалів для систем транспортування водню* / І. М. Дмитрах, Г. М. Никифорчин, А. М. Сиротюк та ін. // Фундаментальні проблеми водневої енергетики / За ред. В. Д. Походенка, В. В. Скорохода, Ю. М. Солоніна. – К.: КІМ, 2010. – С. 309–323.
17. *Capelle J., Dmytrakh I., and Pluvinage G.* Comparative assessment of electrochemical hydrogen absorption by pipeline steels with different strength // Corr. Sci. – 2010. – 52. – P. 1554–1559.
18. *Sensitivity of pipelines with steel API X52 to hydrogen embrittlement* / J. Capelle, J. Gilgert, I. Dmytrakh et al. // Int. J. of Hydrogen Energy. – 2008. – 33. – P. 7630–7641.
19. *Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. пос.* / Під заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 7: Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування / І. М. Дмитрах, А. Б. Вайнман, М. Г. Стащук, Л. Тот / Під ред. І. М. Дмитраха. – К.: Академперіодика, 2005. – 378 с.
20. *Relationship between fatigue crack growth behaviour and local hydrogen concentration near crack tip in pipeline steel* / I. M. Dmytrakh, O. D. Smiyan, A. M. Syrotyuk, and O. L. Bilyy // Int. J. of Fatigue. – 2013. – 50. – P. 26–32.
21. *Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. пос.* / Під заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 13: Працездатність матеріалів і елементів конструкцій з гострокінцевими концентраторами напружень / І. М. Дмитрах, Л. Тот, О. Л. Білий, А. М. Сиротюк / Під ред. В. В. Панасюка. – Львів: Сполом, 2012. – 316 с.

Одержано 15.08.2013