

УДК 620.191.33:620.194.8

**ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИЩИНОСТІЙКОСТІ  
МЕТАЛУ ТРУБОПРОВОДІВ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ****Р. С. Грабовський<sup>1</sup>, Р. А. Барна<sup>2</sup>, М. П. Мазур<sup>1</sup>,  
І. Я. Федорович<sup>1</sup>, О. М. Лепак<sup>1</sup>**<sup>1</sup>*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;  
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15*<sup>2</sup>*Фізико-хімічний інститут НАН України;  
79601, м. Львів, вул. Наукова, 5*

*Для тривало експлуатованих сталей магістральних нафтогазо-проводів здійснено оцінку характеристик опору поширення тріщин на повітрі та в корозивному середовищі (рН 6,7) NS4, яке слугувало моделлю ґрунтової води. Досліджено вплив напряму прокатки на швидкість поширення втомних тріщин. Експериментально визначено параметри зони термічного впливу досліджуваного фрагменту газопровідної труби. Досліджено швидкість розвитку втомних тріщин як у базовому металі газопровідної труби, так і в металі зони термічного впливу зварного шва.*

**Ключові слова:** *магістральні трубопроводи, діаграми циклічної тріщиностійкості трубопровідних сталей, втомні тріщини, пороговий ( $K_{th}$ ) і критичний ( $K_{fc}$ ) коефіцієнти інтенсивності напружень.*

**Вступ**

Останнім часом на магістральних трубопроводах багато аварійних ситуацій виникає внаслідок руйнувань спричинених корозійним розтріскуванням під напругою (стрес-корозією). Крім того, у процесі їх тривалої експлуатації (понад 20 років), метал труб зазнає постійного впливу навантажень (до рівня 0,75 від умовної границі плинності  $\sigma_{0,2}$ ), температури та навколишнього середовища. Процеси деформаційного старіння, що виникають внаслідок мікропластичності, з часом призводять до деградації базового металу труби, при цьому відбувається підвищення  $\sigma_{0,2}$  та збільшення співвідношення  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$  [1], а також зниження відносного залишкового видовження  $\delta$ . Крім того, відбувається зниження характеристик опору в'язкому руйнуванню (на 30-50%) і пов'язані з цим підвищення чутливості до концентраторів напружень та дефектів, посилення схильності металу до утворення осередків руйнування [1, 2].

У даний час приблизно 80 % магістральних нафтопроводів та 55% магістральних газопроводів експлуатують більш як 25 років. [2]. Продовжити термін служби та забезпечити надійну роботу магістральних нафтогазопроводів можна, діагностуючи фактичний стан металу та визна-

чаючи характеристики опору подальшому поширенню тріщиноподібних дефектів у металі труб [3-5] враховуючи при цьому ряд експлуатаційних чинників (статичні, циклічні та динамічні навантаження, а також корозивні середовища), що впливають на імовірний розвиток виявлених пошкоджень.

Для здійснення таких діагностичних оцінок широко використовують сучасні підходи механіки руйнування [6, 7]. Вони дають змогу визначити закономірності розвитку корозійних тріщин під впливом втомних навантажень у глиб стінки труби як в її осьовому так і радіальному напрямках [8]. Ці закономірності представляють у вигляді діаграм циклічної тріщиностійкості, що є залежностями швидкості росту тріщини від коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_1$ . Такі діаграми розміщені між двома його граничними значеннями: нижнім пороговим значенням  $K_{th}$ , що відповідає значенню  $K_1$ , при якому не відбувається ріст корозійно-втомної тріщини, і верхнім  $K_{fc}$ , яке відповідає значенню  $K_1$ , при якому настає спонтанний (катастрофічний) ріст тріщини. Середньоамплітудну ділянку таких діаграм аналітично описують за допомогою степеневі залежності Паріса [9]:

$$V_{\Delta K_1}^c = \frac{dc}{dN} = C \left( \frac{\Delta K}{\sqrt{1-R}} \right)^n, \quad (1)$$

де  $C$  та  $n$  – константи системи “матеріал–середовище”,  $\Delta K_1$  – розмах коефіцієнта інтенсивності напружень ( $\Delta K_1 = K_{\max} - K_{\min}$ ), який визначається як функція робочого тиску в трубі.

Вищезгадані чотири основні параметри діаграми ( $K_{th}$ ,  $K_{fc}$ ,  $C$  та  $n$ ) є характеристиками циклічної тріщиностійкості металу магістральних трубопроводів.

У зв'язку з цим, визначення характеристик циклічної тріщиностійкості трубопровідних сталей та прогнозування умов неконтрольованого руйнування дефектних труб магістральних нафтогазопроводів є актуальною науково-технічною проблемою.

Мета даної роботи – експериментально оцінити характер субкритичного розвитку макротріщини тривало експлуатованого металу магістральних трубопроводів у заданих середовищах ґрунтуючись на підходах механіки руйнування.

### **Визначення циклічної тріщиностійкості металу труб.**

Досліджували експлуатований 41 рік при максимальному робочому тиску газу  $P_{\max} = 5,4$  МПа метал (сталь 17Г1С,  $\sigma_B = 562,5$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 357,5$  МПа,  $\delta = 27,0\%$ ) магістрального газопроводу “Київ–Західна Україна” та експлуатований 47 років при максимальному тиску

нафти  $P_{\max} = 4,1$  МПа метал (сталь 10Г2БТЮ3,  $\sigma_B = 584,7$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 451,3$  МПа,  $\delta = 24,8\%$ ) магістрального нафтопроводу “Дружба”.

Дослідження циклічної тріщиностійкості експлуатованих металів магістральних трубопроводів проводили на спеціальному експериментальному обладнанні [10] шляхом випробувань зразків (рис. 1 а, б) [11] з прямокутним (ПЗ) поперечним перерізом (табл. 1) з початковою краювою тріщиною  $c = 0,9 \dots 1,4$  мм в умовах консольного згину. Крім того, для спеціальних досліджень тріщиностійкості металу в осьовому напрямку труби (тут діють максимальні розтягуючі напруження) використовували аркові зразки (АЗ) (рис. 1 в) [11]. Вивчали особливості розвитку тріщини в досліджуваних середовищах як у основному (базовому) металі труби так і в зоні термічного впливу зварного шва. Частота циклічного навантаження синусоїдальної форми становила 1 Гц при асиметрії циклу навантаження  $R \approx 0$ . Випробування проводили як на повітрі, так і в корозивному середовищі (рН 6,7) NS4 (0,483 NaHCO<sub>3</sub> g/l; 0,120 KCl; 0,137 CaCl<sub>2</sub>; 0,131 MgCl<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O), яке слугувало моделлю ґрунтової води [12]. Температура досліджуваних середовищ була постійна  $T = 20^\circ\text{C}$ .

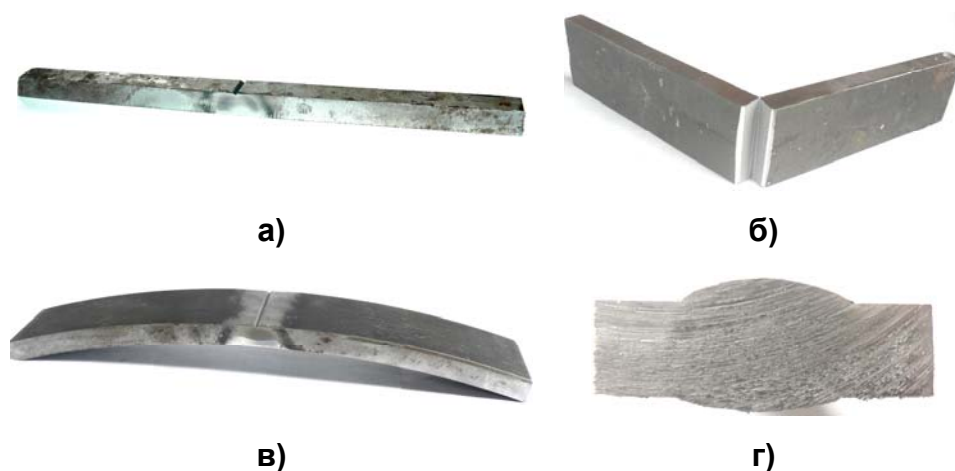


Рис. 1. Загальний вигляд досліджуваних зразків зі сталей 10Г2БТЮ3 (а) та 17Г1С (б, в, г):

ПЗ – вирізаний з котушки труби в осьовому напрямі труби

(тріщина поширюється поперек прокату) (а, б);

АЗ – вирізаний з котушки труби в радіальному напрямі (тріщина поширюється в основному металі труби у напрямку прокату) (в);

Таблиця 1. Поперечні розміри зразків

Тип трубопроводу ( $D \times t$ , мм)	$b \times h$ , мм
Нафтопровід “Дружба” (530×9)	10,0×9,0
Газопровід “Київ–Західна Україна” (1020×14)	50,0×14,0

Найбільш слабким місцем труб магістральних трубопроводів є зварне з'єднання [13]. Параметри зони термічного впливу досліджуваного фрагменту труби магістрального газопроводу “Київ–Західна Україна” визначали експериментально з допомогою мікротвердоміра марки ПМТ-3М, до комплексу якого входить мікротвердомір ПМТ-3М, міні-прес ПМТ-П для надання паралельності поверхні зразка відносно оптичної системи, набір об'єктивів, комплект наважок, фотоелектричний окулярний мікрометр ФОМ-2-16 для визначення лінійних розмірів діагоналей відбитка пірамідки мікротвердоміра та приєднаний до нього електронно-обчислювальний пристрій КС-16.00. За допомогою даного пристрою обчислювали мікротвердість досліджуваного зразка (рис. 1 г) за визначеними лінійними розмірами, який приєднувався до принтера для виведення результатів обчислень.

При проведенні експерименту використовували об'єктив з параметрами ( $F=6,3$ ;  $A=0,60$ ). Навантаженням слугувала наважка масою 50 г. Час опускання алмазної пірамідки на поверхню зразка становив 10 с. Час витримки – 15 с. Для визначення мікротвердості алмазну пірамідку під навантаженням опускали на поверхню зразка, після чого з допомогою фотоелектричного окулярного мікрометра ФОМ-2-16 замірялися діагоналі одержаного відбитка. Дана інформація надходила на електронно-обчислювальний пристрій КС-16.00, в який попередньо заносили дані про навантаження в ньютонах та реальне збільшення використовуваного об'єктива.

Мікротвердість заміряли за схемою нанесення уколів, яка дозволяє забезпечити визначення мікротвердості поверхні з дискретизацією 50 мкм, задовольняючи умову вимірювання (відстань між відбитками повинна бути не менше 3-5 діагоналей відбитка).

На рис. 2 представлено зміну мікротвердості досліджуваного матеріалу за зонами (сталь 17Г1С – зона термічного впливу – зона сплавлення – зона термічного впливу – сталь 17Г1С). З одержаних результатів можна чітко виділити зони досліджуваного зварного з'єднання.

З графічно представлених результатів експерименту видно, що протяжність зони сплавлення у даному зварному з'єднанні становить 15 мм, зона термічного впливу зі сторони сталі 17Г1С становить 3,5 мм.

Для побудови діаграми циклічної тріщиностійкості для досліджуваних систем “трубопровідна сталь–середовище” необхідно одержати дані про глибину  $c$  тріщини, кількість циклів навантаження  $N$  та оцінити величину коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_I$  у її вершині.

Глибину тріщини  $c$  вимірювали катетометром КМ-8. Разом з тим визначали швидкості розвитку тріщини як відношення приросту її довжини  $c$  між двома послідовними вимірами  $n$  та  $(n+1)$  від кількості циклів навантаження  $N$  за які цей приріст відбувся, тобто

$$\frac{dc}{dN} = \frac{c_{(n+1)} - c_n}{N_{(n+1)} - N_n} \quad (2)$$

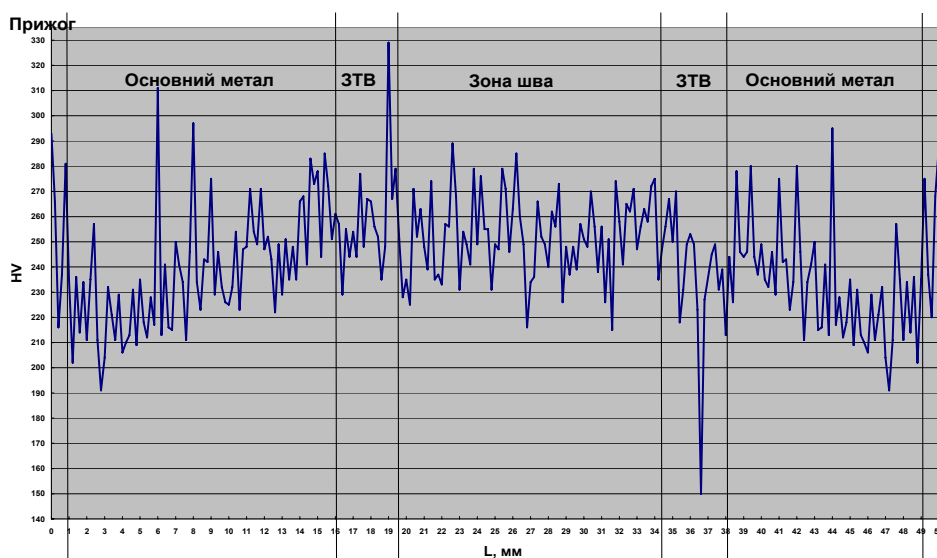


Рис. 2. Зміна мікротвердості досліджуваного об'єкту вздовж тріщини за зонами (сталь 17Г1С – зона термічного впливу – зона сплавлення – зона термічного впливу – сталь 17Г1С) з зовнішнього боку труби

Крім цього, кожне значення швидкості розвитку тріщини  $dc/dN$  ставили відповідно до значення коефіцієнта інтенсивності напружень  $\Delta K_I$ , яке визначали за такою формулою [14]:

$$\Delta K_I = Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{c}, \quad (3)$$

де  $\sigma$  – прикладені зусилля;  $t$  – висота зразка (товщина стінки труби);  $c$  – довжина тріщини в глибину.

Функція  $Y$  відносної довжини тріщини змінювалась у межах  $0 \leq \lambda \leq 0,8$  і обчислювалась залежністю:

$$\begin{cases} Y = 1,99 - 0,41\left(\frac{c}{t}\right) + 18,7\left(\frac{c}{t}\right)^2 - 38,48\left(\frac{c}{t}\right)^3 + 53,85\left(\frac{c}{t}\right)^4 & \text{для } 0 < \frac{c}{t} \leq 0,6 \\ Y = \left[ \frac{1}{2}\left(\frac{c}{t}\right)^{-\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{c}{t}\right)^{-\frac{3}{2}} \left(1 + 3\frac{c}{t}\right) \right] & \text{для } 0,6 < \frac{c}{t} \leq 0,8 \end{cases}$$

Використовуючи одержані експериментально дані, будували діаграми циклічної корозійної тріщиностійкості для досліджуваних систем “трубопровідна сталь–середовище”:

$$\frac{dc}{dN} = \Phi(K_I). \quad (4)$$

Причому аналітично описували середньоамплітудні ділянки побудованих діаграм в інтервалі зміни швидкостей розвитку тріщини  $dc/dN = 1 \cdot 10^{-8} \div 1 \cdot 10^{-6}$  м/цикл, використовуючи степеневу функцію (1), запропоновану Парісом [9].

Результати випробувань представлено у вигляді діаграм циклічної тріщиностійкості. Такі діаграми для різних середовищ випробувань експлуатованого металу наведено на рис. 3-5.

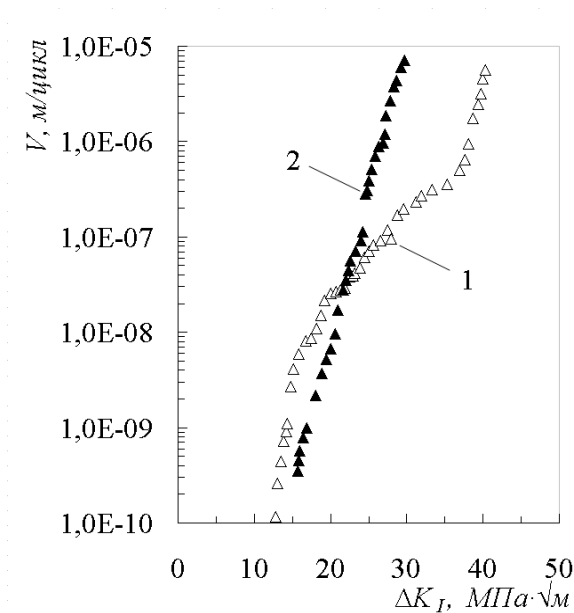


Рис. 3. Діаграми циклічної тріщиностійкості базового металу магістрального нафтопроводу “Дружба” на повітрі (1) та в середовищі NS4 (2)

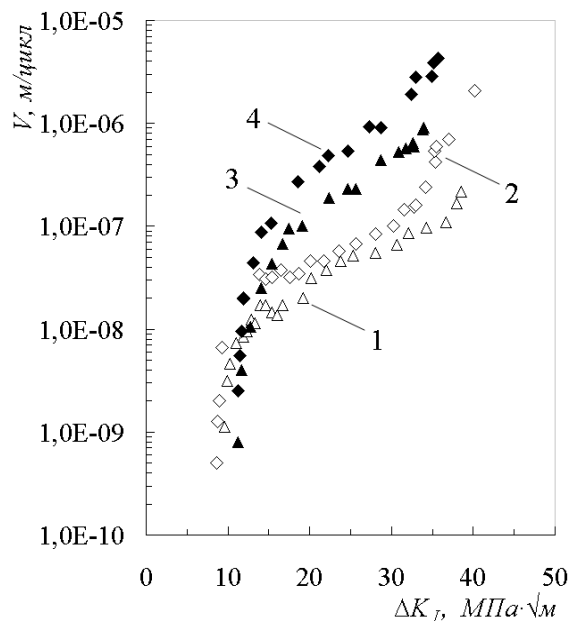


Рис. 4. Діаграми циклічної тріщиностійкості базового металу (зразки – ПЗ (2, 4) та АЗ (1, 3) ) магістрального газопроводу “Київ-Західна Україна” на повітрі (1, 2) та в середовищі NS4 (3, 4)

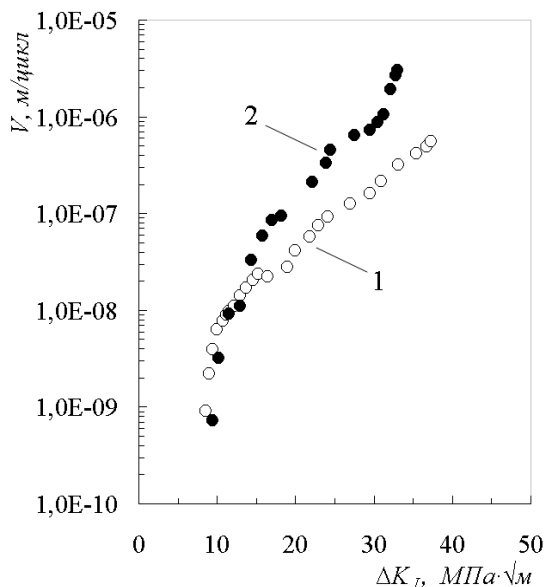


Рис. 5. Діаграми циклічної тріщиностійкості металу зони термічного впливу зварного шва магістрального газопроводу “Київ–Західна Україна” на повітрі (1) та в середовищі NS4 (2)

Для зазначених вище умов випробувань сталей 10Г2БТЮ3 та 17Г1С, в таблиці 3 наведено значення констант у степеневій залежності Паріса [8, 9]. Тут також подано відповідні значення порогового ( $\Delta K_{th}$ ) та критичного ( $\Delta K_{fc}$ ) коефіцієнтів інтенсивності напружень.

Таблиця 2. Характеристики циклічної тріщиностійкості експлуатованих сталей нафтогазопроводів

Система “метал–середовище”	$C,$ $\frac{мм}{цикл} \cdot (МПа\sqrt{м})^{-n}$	$n$	$\Delta K_{th},$ $(МПа\sqrt{м})^{-n}$	$\Delta K_{fc},$ $(МПа\sqrt{м})^{-n}$
10Г2БТЮ3–повітря	$1,70 \cdot 10^{-15}$	5,44	12,43	41,17
10Г2БТЮ3–NS4	$2,91 \cdot 10^{-31}$	17,19	15,23	31,08
17Г1С (ПЗ)–повітря	$7,56 \cdot 10^{-12}$	2,99	8,59	41,87
17Г1С (ПЗ)–NS4	$1,18 \cdot 10^{-13}$	4,84	10,93	37,12
17Г1С (АЗ)–повітря	$2,21 \cdot 10^{-11}$	2,40	9,04	42,44
17Г1С (АЗ)–NS4	$3,20 \cdot 10^{-13}$	4,22	11,58	37,83
17Г1С (АЗ ЗТВ)– повітря	$2,95 \cdot 10^{-12}$	3,27	7,83	38,72
17Г1С (АЗ ЗТВ)–NS4	$2,57 \cdot 10^{-14}$	5,19	8,59	34,52

Порівняння отриманих результатів (див. рис. 2 та табл. 2) показало відмінність характеристик циклічної тріщиностійкості ( $K_{th}$ ,  $K_{fc}$ ,  $C$  та  $n$ ) є характеристиками циклічної тріщиностійкості металу експлуатованого металу магістрального нафтопроводу “Дружба” при випробуваннях на повітрі і в корозивному середовищі (рН 6,7) NS4. Тут константи систем “матеріал–середовище” ( $C$  та  $n$ ), а також як порогові ( $\Delta K_{th}$ ), так і критичні ( $\Delta K_{fc}$ ) коефіцієнти інтенсивності напружень суттєво відрізняються між собою.

Кількісно [158] вплив робочого середовища на корозійну тріщиностійкість досліджуваного металу магістрального нафтопроводу “Дружба” (сталь 10Г2БТЮ3) оцінювали, порівнюючи значення розмаху коефіцієнтів інтенсивності напружень, які відповідають швидкості росту тріщини  $dc/dN = 10^{-7}$  м/цикл у середовищі ( $\Delta K_c^*$ ) та на повітрі ( $\Delta K_n^*$ ), тобто:

$$k_c = \frac{\Delta K_c^*}{\Delta K_n^*}. \quad (5)$$

У табл. 3 наведено значення  $\Delta K_n^*$ ,  $\Delta K_c^*$  та  $k_c$  для досліджуваних систем “сталь 10Г2БТЮ3–середовище”. Їх аналіз показує, що водне середовище (NS4) суттєво зменшує опір розвитку корозійно-втомної тріщини. Причому спостерігається (див. рис. 3) відчутний вплив корозивного середовища на швидкість поширення втомної тріщини на другій (середньоамплітудній) та третій (високоамплітудній) ділянці діаграми циклічної тріщиностійкості металу нафтопроводу, оскільки  $k_c$  становлять приблизно 0,87 від значень в інертному середовищі (на повітрі). Слід зауважити, що на першій (низькоамплітудній) ділянці діаграми основним механізмом впливу корозійного середовища на процеси руйнування металу нафтопроводу є локальне розчинення металу в околі вершини тріщини [15], яке призводить до затуплення її вершини і як наслідок початок розвитку корозійно-втомної тріщини настає за більш високого значення порогового ( $\Delta K_{th}$ ) коефіцієнта інтенсивності напружень.

Таблиця 3. Значення  $\Delta K_n^*$ ,  $\Delta K_c^*$  та  $k_c$  для різних систем “сталь 10Г2БТЮ3–середовище”

№ з/п	Система “метал–середовище”	$\Delta K_{n,c}^*$ $(MPa \sqrt{m})^{-n}$	$k_c$
1	Сталь 10Г2БТЮ3–повітря	27,52	1,00
2	Сталь 10Г2БТЮ3–NS4	24,03	0,87



У табл. 4 наведено значення  $\Delta K_n^*$ ,  $\Delta K_c^*$  та  $k_c$  для різних систем “сталь 17Г1С–середовище”.

Таблиця 4. Значення  $\Delta K_n^*$ ,  $\Delta K_c^*$  та  $k_c$  для різних систем “сталь 17Г1С–середовище”

№ з/п	Система “метал–середовище”	$\Delta K_{n,c}^*$ $(\text{МПа}\sqrt{\text{м}})^{-n}$	$k_c$
1	Сталь 17Г1С (ПЗ)–повітря	30,22	1,00
2	Сталь 17Г1С (ПЗ)–NS4	15,29	0,51
3	Сталь 17Г1С (АЗ)–повітря	36,71	1,00
4	Сталь 17Г1С (АЗ)–NS4	19,12	0,52

Аналіз наведених у табл. 4 значень показує, що досліджуване водне середовище суттєво зменшує опір розвитку корозійно-втомної тріщини. Спостерігається відчутний вплив середовища на швидкість поширення втомної корозійної тріщини в досліджуваних напрямках. Так в напрямку поперечному до прокатки, тобто в прямокутних зразках з експлуатованої сталі,  $k_c$  становлять приблизно 0,51 від значень у повітряному середовищі. Аналогічно значення цього коефіцієнта для розвитку тріщини в напрямку прокатки, тобто в аркових зразках з експлуатованої сталі, становлять приблизно 0,52 від значень у повітряному середовищі.

Якщо ввести аналогічний коефіцієнт стосовно напрямку прокатки  $k_{np}$ :

$$k_{np} = \frac{\Delta K_{n,c}^{*ПЗ\ БМ}}{\Delta K_{n,c}^{*АЗ\ БМ}}, \quad (6)$$

то в осьовому (поздовжньому) напрямку труби (див. табл. 5), як на повітрі ( $k_{np} = 0,82$ ), так і в корозійному середовищі ( $k_{np} = 0,80$ ), на середньоамплітудній ділянці Паріса спостерігається більш сповільнений розвиток втомної тріщини, ніж у поперечному напрямку прокатки.

Таблиця 5. Значення  $\Delta K_n^*$ ,  $\Delta K_c^*$  та  $k_c$  для різних систем “сталь 17Г1С–середовище”

№ з/п	Система “метал–середовище”	$\Delta K_{n,c}^{*ПЗ\ БМ}$ $(\text{МПа}\sqrt{\text{м}})^{-n}$	$\Delta K_{n,c}^{*АЗ\ БМ}$ $(\text{МПа}\sqrt{\text{м}})^{-n}$	$k_{np}$
1	Сталь 17Г1С–повітря	30,22	36,71	0,82
2	Сталь 17Г1С–NS4	15,29	19,12	0,80

Порівняння отриманих результатів дослідження розвитку тріщини в осьовому (поздовжньому) напрямку труби як у базовому металі (БМ) труби, так і в металі зони термічного впливу (ЗТВ) зварного шва (див. рис. 4 та табл. 2) показало суттєву відмінність характеристик циклічної тріщиностійкості експлуатованого металу магістрального газопроводу “Київ–Західна Україна” при випробуваннях на повітрі і в корозивному середовищі (NS4). Тут порогові  $\Delta K_{th}$  та критичні коефіцієнти інтенсивності напружень  $\Delta K_{fc}$  суттєво відрізняються між собою. Причому для базового металу та металу зони термічного впливу (ЗТВ) зварного шва порогові коефіцієнти інтенсивності напружень  $\Delta K_{th}$  на повітрі відповідно в 1,28 та 1,10 раза менші за їх значення в середовищі NS4, тоді як критичні коефіцієнти інтенсивності напружень  $\Delta K_{fc}$  навпаки – в 1,12 рази більші.

Даний факт відображає домінуючий вплив на першому етапі локального розчинення металу в околі вершини тріщини внаслідок електрохімічних реакцій [15], що полягає у створенні додаткової дефектності матеріалу в зоні перед руйнування. Тобто відбувається локальне електрохімічне розчинення металу в околі вершини, пов’язане із впливом іонів  $Cl^-$ , які стимулюють корозійні процеси, що в результаті призводить до затуплення вершини тріщини.

На другому етапі домінуючим механізмом впливу корозійного середовища на процеси руйнування металу трубопроводів є механізм водневого окрихчення, суть якого полягає у пониженні міцності матеріалу внаслідок дифузії в метал водню, що утворився в результаті електрохімічних реакцій [15]. Такий електролітично утворений водень, проникаючи в метал, послаблює в ньому зв’язки і призводить до його окрихчення [11]. Досягнення воднем критичної концентрації [16] призводить до утворення окремих мікротріщин, які, з’єднуючись із магістральною макротріщиною, сприяють прискоренню процесу її подальшого розвитку.

Кількісно вплив робочого середовища на тріщиностійкість досліджуваного основного металу та металу зони термічного впливу зварного з’єднання ( $k_{ЗТВ}$ ) магістрального газопроводу “Київ–Західна Україна” оцінювали, порівнюючи значення розмаху коефіцієнтів інтенсивності напружень, які відповідають швидкості росту тріщини  $dc/dN = 10^{-7}$  м/цикл у відповідному середовищі основного металу ( $\Delta K_{n,c}^{*A3\text{ БМ}}$ ) та металу зони термічного впливу зварного шва ( $\Delta K_{n,c}^{*A3\text{ ЗТВ}}$ ), тобто

$$k_{ЗТВ\ ЗШ} = \frac{\Delta K_{n,c}^{*A3\text{ ЗТВ}}}{\Delta K_{n,c}^{*A3\text{ БМ}}} \quad (7)$$

В осьовому (поздовжньому) напрямку труби (див. табл. 4), як на повітрі ( $k_{ЗТВ} = 0,74$ ) так і в корозійному середовищі ( $k_{ЗТВ} = 0,97$ ), на середньоамплітудній ділянці Паріса спостерігається більш прискорений розвиток втомної тріщини в зоні термічного впливу зварного з'єднання ніж у основному металі газопроводу.

Таблиця 6. Значення  $\Delta K_{n,c}^{*A3 БМ}$ ,  $\Delta K_{n,c}^{*A3 ЗТВ}$  та  $k_{ЗТВ}$  для різних систем „сталь 17Г1С – середовище”

№ з/п	Система “метал–середовище”	$\Delta K_{n,c}^{*A3 БМ}$ $(МПа \sqrt{м})^{-n}$	$\Delta K_{n,c}^{*A3 ЗТВ}$ $(МПа \sqrt{м})^{-n}$	$k_{ЗТВ}$
1	Сталь 17Г1С–повітря	36,71	27,02	0,74
2	Сталь 17Г1С–NS4	19,12	18,62	0,97

Аналіз результатів проведених досліджень показує, що із зростанням агресивності середовища випробувань (повітря–грунтова вода) циклічна тріщиностійкість експлуатованого металу досліджуваних трубопроводів знижується, тобто середньоамплітудна ділянка діаграм циклічної корозійної тріщиностійкості досліджуваних сталей характеризується більшою крутизою (див. рис. 2 – рис. 4).

#### Висновки.

Виявлено відчутний вплив корозивного середовища NS4 ( $pH 6,7$ ), тобто моделі ґрунтової води, на опір поширенню втомної тріщини у тривало експлуатованих трубопровідних сталях (10Г2БТЮ3, 17Г1С), оскільки діаграми циклічної корозійної тріщиностійкості цих сталей характеризуються більшою крутизою порівняно із аналогічними діаграмами на повітрі. Крім того, константи  $n$  та  $C$  у степеневій залежності Паріса для досліджуваних систем “метал–середовище” є суттєво більшими, а відповідні значення критичного ( $\Delta K_{fc}$ ) коефіцієнтів інтенсивності напружень є меншими, тоді як величина порогових ( $\Delta K_{th}$ ) коефіцієнтів інтенсивності напружень є більшою, що вказує на домінуючу роль корозійних процесів на початковому етапі розвитку втомних тріщин для досліджуваних систем.

Встановлено, що в осьовому (поздовжньому) напрямку труби більш сповільнений розвиток як втомної, так і корозійно-втомної тріщин ніж у поперечному напрямку прокатки.

Визначено розміри зон термічного впливу для труби магістрального газопроводу “Київ–Західна Україна” та досліджено, що метал зони термічного впливу зварного з'єднання є найбільш чутливий до розвитку як втомної, так і корозійно-втомної тріщин у порівнянні з основним (базовим) металом газопровідної труби.

### Література

1. Красовський А.Я. Оцінка залишкового ресурсу трубопроводу, ушкодженого стресс-корозією / А.Я. Красовський, І.В. Ориняк, І.В. Лохман // Трубопровідний транспорт. – 2011. – № 2 (68). – С. 18-21.
2. Крижанівський Є.І. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: [наук.-техн. посіб. у 3-х т.] / Є.І. Крижанівський, Г.М. Никифорчин; під заг. ред. В.В. Панасюка. – Івано-Франківськ – Львів: Вид-во Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, 2011. – Т. 1: Основи оцінювання деградації трубопроводів. – 2011. – 457 с.
3. Комплекс технічних засобів для електромагнітного неруйнівного контролю конструкцій тривалої експлуатації / З.Т. Назарчук, А.Я. Тетерко, В.Г. Рибачук [та ін.] // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин (“РЕСУРС”): звітна сесія цільової комплексної програми, 6-8 січня 2006 р.: наук.-техн. збірник під заг. ред. Б.Є. Патона. – К.: Національна академія наук України, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, 2006. – С. 39-42.
4. Створення сучасних методів технічної діагностики працездатності систем пароводяного тракту енергоблоків ТЕС / І.М. Дмитрах, А.М. Сиротюк, Б.П. Русин [та ін.]; під заг. ред. Б.Є. Патона // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – К.: Інститут електрозварки ім. Є.О. Патона НАН України. – 2006. – С. 62-66.
5. Методологія і експертна система для поточного моніторингу реального стану і забезпечення цілісності трубопроводів з метою подовження їх ресурсу / А.Я. Красовський, І.В. Ориняк, В.М. Тороп [та ін.] // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин (“РЕСУРС”): звітна сесія цільової комплексної програми, 6-8 січня 2006 р.: наук.-техн. збірник під заг. ред. Б.Є. Патона. – К.: Національна академія наук України, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, 2006. – С. 309-314.
6. Айнбиндер А.Б. Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость / А.Б. Айнбиндер – М.: Недра, 1991. – 288 с.
7. Панасюк В.В. Механика квазихрупкого разрушения материалов / В.В. Панасюк. – К.: Наук. думка, 1991. – 416 с.
8. Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посібник / під заг. ред. В.В. Панасюка. – Том 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.: ВД “Академперіодика”, 2005. – 378 с.
9. Пэрис П. Критический анализ законов распространения трещин / П. Пэрис, Ф. Эрдоган // Техническая механика. – 1963. – Сер. Е, № 4. – С. 60-66.

10. Грабовский Р.С. Установка для испытаний конструкционных материалов на циклическую коррозионную трещиностойкость / Р.С. Грабовский, И.Н. Дмытрах, Я.Н. Пукас [и др.] // Деп. ВИНТИ № 67 68 – В 89 от 10.11.1989 г. – С. 8.
11. Механика разрушения и прочность материалов: [справ. пособ. в 4-х т. / О.Н. Романив, С.Я. Ярема, Г.Н. Никифорчин и др.; под общ. ред. В.В. Панасюка]. – К.: Наук. думка, 1990. – Т. 4: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов. – 680 с.
12. Sensitivity of pipelines with steel API X52 to hydrogen embrittlement / J.Caprille, J. Gilgert, I. Dmytrakh et al. // Int. J. Hydrogen Energy. – 2008. – 33, № 24. – P. 7630-7641.
13. Занковец П.В. Использование математического моделирования для исследования влияния сварочных материалов на качество сварных соединений трубопроводов [Текст] / П.В. Занковец // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – Трубопроводный транспорт: теория и практика. – М., 2010. – №4. – С. 24-27.
14. Механіка руйнування і міцність матеріалів [Текст]: довідн. посіб. / За заг. ред. В.В. Панасюка. – Том 13: Працевдатність матеріалів і елементів конструкцій з гострокінцевими концентраторами напружень / І.М. Дмитрах, Л. Тот, О.Л. Білий, А.М. Сиротюк: [за ред. В.В. Панасюка]. – Львів: СПОЛОМ, 2012. – 316 с.
15. Дмитрах І.М. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень / І.М. Дмитрах, В.В. Панасюк – Львів: Національна академія наук України. Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка. – 1999. – 341 с.
16. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения / Г.П. Черепанов. – М.: Наука, 1974. – 640 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії 27.12.2014 р.*

*Рекомендовано до друку член-кореспондентом НАН України,*

*д.т.н., професором Крижанівським Є.І.,*

*д.ф.-м.н., професором Стащук М.Г. (м. Львів)*

## ESTIMATION OF CHARACTERISTICS FOR CRACK RESISTANCE OF METAL PIPELINES DURING CONTINUOUS OPERATION

**R.S. Hrabovsky<sup>1</sup>, R.A. Barna<sup>2</sup>, M.P. Mazur<sup>1</sup>,  
I.Ya. Fedorovych<sup>1</sup>, O.M. Lepak<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Ivano-Frankivs'k National Technical University of Oil and Gas;  
76019, Ivano-Frankivs'k, Carpathians str., 15*

<sup>2</sup>*Karpenko Physiko-Mechanical Institute,  
79601, Lviv, Naukova St., 5*

---

*During continuous operation of steels of major pipelines characteristics of resistance for cracks spreading in the air and corrosive medium (pH 6,7) NS4 have been estimated that was used as a model of ground water. The influence of rolling direction on the spreading velocity of fatigue cracks has been researched. Parameters of the thermal influence zone of the researched section of the gas pipeline have been measured experimentally. The rate of fatigue cracks development has been studied in the metal of the gas pipeline and basic metals of the thermal influence zone of the weld seam as well.*

**Key words:** *major pipeline, diagram of cylindrical crack resistance for pipe steels, fatigue crack, threshold ( $K_{th}$ ) and critical ( $K_{fc}$ ) indices of stress intensity.*