

УДК 620.191.33: 620.193

В. С. Лужецький, канд. техн. наук, О. М. Лепак

ЧИСЕЛЬНО-АНАЛІТИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ КІНЕТИКИ РОСТУ КОРОЗІЙНО-ВТОМНИХ ТРІЩИН У СТІНКАХ ТРУБОПРОВІДІВ

Наведено результати чисельної оцінки кінетики та зміни форми корозійно-механічних тріщиноподібних дефектів при їх розвитку в стінці трубопроводу для різних систем “матеріал – середовище”. Показано, що початкова форма дефекту завжди впливає на кінетику його подальшого поширення в глибину стінки труби.

Ключові слова: тривало експлуатований трубопровід, корозійно-механічний дефект, тріщиноподібний дефект, кінетика росту тріщини, коефіцієнт інтенсивності напружень.

Вступ. Актуальність досліджень. Вивчення проблеми корозійно-втомного руйнування металів займає в механіці руйнування особливе місце. Численні дослідження та дані технічної діагностики [1–3] свідчать, що довговічність тривало експлуатованих трубопроводів визначається закономірностями розвитку в їхніх стінках корозійно-механічних дефектів тріщиноподібного типу в умовах сумісної дії експлуатаційних циклічних навантажень, температур та агресивних робочих середовищ. Саме розміри тріщиноподібних дефектів характеризують технічний стан трубопроводів. Тому у сучасній інженерній практиці аналіз геометричних параметрів та форми дефектів з позиції механіки руйнування розглядається як найбільш адекватна основа для оцінювання конструктивної міцності та ресурсу роботи трубопровідних систем.

Відомі в літературі методи оцінки пошкоджених трубопроводів ґрунтуються здебільшого на гранично-рівноважному стані труби із дефектами відповідного типу (корозійні виразки або тріщини). Такі підходи дають можливість прогнозувати і оцінювати моменти катастрофічного руйнування труби, однак, не розглядають стадії руйнування, які передують досягненню цього граничного стану.

Дослідженням різних аспектів цієї проблеми займалися як вітчизняні, так і зарубіжні вчені. Перш за все слід відмітити праці В. В. Панасюка [2–3, 8], М. П. Саврука [4], О. Є. Андрейківа [1, 5] та інших, в яких теоретично вивчено розподіл пружних та пружно-пластичних напружень біля тріщин у циліндричних оболонках. У працях Ю. Мураками [17], А. Я. Красовського та І. В. Ориняка [7, 9, 10] запропоновані чисельно-аналітичні методи обчислення коефіцієнтів інтенсивності напружень для тріщин різної форми та розташування в циліндричних тілах під дією навантажень, що моделюють експлуатаційні навантаження на трубопровід. Проблеми корозії та корозійної втоми трубопровідних сталей розглянуто в працях В. І. Похмурського [11], Р. К. Мелехова [12],

В. Т Троценка [13], Р. Паркінса [16, 17], П. Маркуса [18, 19], де наведені фізико-хімічні та електрохімічні основи, пов'язані з цією проблемою.

Водночас необхідно взяти до уваги той факт, що руйнування матеріалу під довготривалою дією експлуатаційних чинників є багатостадійним процесом і вплив кожної стадії, врешті-решт, і визначає довговічність елемента труби в заданих експлуатаційних умовах. Тому принципово важливий є субкритичний ріст корозійних чи тріщиноподібних дефектів, зумовлений сумісною дією експлуатаційних навантажень та середовищ. В існуючих підходах ці процеси ще недостатньо вивчені та їх не враховують під час прогнозування роботоздатності трубопроводів, зокрема деградацію фізико-механічних властивостей експлуатованого металу.

Отже, розроблення методів оцінювання міцності та довговічності тривало експлуатованих трубопровідних систем різного призначення з урахуванням субкритичного росту корозійно-механічних дефектів – актуальна науково-технічна задача.

Мета дослідження. Чисельна оцінка потенційно небезпечних розмірів тріщиноподібних дефектів у стінці трубопроводу.

Об'єкт і методи дослідження. Тріщиноподібний дефект у стінці трубопроводу (з внутрішнім діаметром d і товщиною стінки t) моделювали півеліптичною тріщиною із розмірами півосей c та a (рис. 1). Вважали, що дефект розвивається з числом циклів навантаження N , зберігаючи півеліптичну форму. Однак співвідношення півосей c та a є змінним: $c/a = f(C_m, N)$.

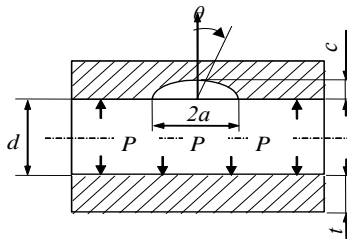


Рис. 1 – Схематизація дефекту в стінці труби

Вважали, що опір поширенню тріщини як у напрямку півосі c , так і півосі a повністю визначає діаграма циклічної корозійної тріщиностійкості металу труби (діаграма швидкостей росту втомної макротріщини), яку одержали з урахуванням заданих експериментальних умов [14]. Середньоамплітудні ділянки цих діаграм у діапазоні зміни швидкостей росту тріщини $dc/dN = 10^{-8} \div 10^{-6}$ м/цикл описали аналітично за допомогою степеневі залежності Періса

$$dc/dN = da/dN = C(\Delta K)^n, \quad (1)$$

де C та n – константи системи “матеріал – середовище”.

Крім цього, для кожної із систем “матеріал – середовище” визначали відповідні значення порогового (K_m) та критичного (K_{fc}) коефіцієнтів інтенсивності напружень.

Для підрахунку значень коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK_I використовували відому залежність Б. Бейзермана:

$$\Delta K_I = \Delta\sigma \cdot \sqrt{\pi c} \cdot \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1.12 - 0.48\beta + 0.13 \left(\frac{2\theta}{\pi} \right)^2 \cdot \beta(3\beta - 2 - \alpha)}{1 - \alpha(1 - 0.75\beta)} + \right. \\ \left. + 1.13k_f \left[\beta \left(\frac{2\theta}{\pi} \right)^2 \cdot (\alpha - 0.4 + 0.6\beta) + \beta(1 - 1.4\alpha) + 0.62\lambda(1 - \beta) \cdot \psi(\alpha) \right] \right\}, \quad (2)$$

де $\Delta\sigma$ – розмах розтягувальних напружень за цикл навантаження; $\Delta\sigma = (\Delta p \cdot d)/2t$; Δp – зміна тиску робочого середовища в трубопроводі за цикл навантаження; d – внутрішній діаметр труби; t – товщина стінки труби; c – глибина тріщини; $\beta = c/a$ ($0 \leq \beta \leq 1$; $0 \leq \alpha \leq 0,4$); a – довжина тріщини; θ – кут від малої осі півеліптичної тріщини (рис. 1); $\alpha = c/t$; k_f – коефіцієнт, що враховує відхилення поперечного перерізу труби від колового:

$$\lambda = \begin{cases} 1,0; & \alpha \geq 1/20 \\ 1,15 - 60(\alpha)^2; & 0 \leq \alpha \leq 1/20; \end{cases}$$

$$\psi(\alpha) = (\alpha)^{-1/2} \cdot \sqrt{(1 - \alpha)^{-3} - (1 - \alpha)^3}$$

Досліджували особливості впливу форми одиночних та множинних корозійно-механічних тріщиноподібних дефектів, що визначається співвідношенням (c/a), на потенційно небезпечні розміри корозійно-механічних тріщиноподібних дефектів у стінці труби заданих розмірів. Під потенційно небезпечним розміром тріщиноподібного дефекту вважали корозійну тріщину глибиною $c = c_{th}$, у вершині якої значення коефіцієнта інтенсивності напружень рівне пороговому, тобто $K_I = K_{th}$. Ця умова визначає початок розвитку корозійної макротріщини глибиною c_{th} .

Під час розрахунку кінетики розвитку тріщиноподібних дефектів накладені такі умови. За базу вибирали ріст тріщини в глибину стінки, тобто в напрямку півосі c . При цьому вважали, що початковий розмір (глибина) тріщини є однаковим для всіх розглядуваних випадків c/a : $c_0 = 1,0$ мм. Розраховували, припускаючи, що тріщина розвивається стрибкоподібно з деяким постійним кроком $\Delta c_i = 0,5$ мм. При розрахунку діапазон зміни глибини тріщини: $c_0 \leq c \leq 0,8$ т.

Послідовність розрахунку така:

1. Для початкової глибини тріщини $c_0 = 1,0$ мм за формулою (2) підраховували значення коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK_I , якщо $\theta = 0$.

2. За цим значенням ΔK_I з формули (1) визначали очікувану швидкість росту тріщини в глибину стінки труби dc/dN .

3. За одержаним значенням dc/dN визначали число циклів навантаження dN_i , необхідне для приросту тріщини на величину $\Delta c_i = 0,5$ мм:

$$dc/dN = \Delta c_i / \Delta N_i \rightarrow \Delta N_i = \Delta c_i / (dc/dN).$$

4. Для тієї ж початкової глибини тріщини $c_0 = 1,0$ мм за формулою (2) розраховували значення коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK_I при $\theta = \pi/2$.

5. За цим значенням ΔK_I з формули (1) визначали очікувану швидкість росту тріщини по довжині труби da/dN .

6. За одержаним значенням da/dN визначали приріст тріщини на величину Δa_i за число циклів навантаження ΔN_i (обчислене в пункті 3):

$$da/dN = \Delta a_i / \Delta N_i \rightarrow \Delta a_i = \Delta N_i / (da/dN).$$

7. За даними, одержаними згідно з пунктами 1–6, визначали нові розміри півеліптичної тріщини після її першого стрибкоподібного росту:

$$c_i = c_0 + \Delta c_i; 2a_i = 2a_0 + 2\Delta a_i.$$

Далі розглядали наступний приріст тріщини, тобто повторювали наведений вище розрахунок, приймаючи за початкові розміри тріщини c_i та $2a_i$. Обчислення закінчували з досягненням тріщиною глибини $c_n = 0,8 t$, при цьому порогові (c_{th}) та руйнівні ($2a_p$) розміри напівеліптичної тріщини, в залежності від її початкових розмірів та форми, (c_{th}/a_0) а також умов експлуатації. Крім того, визначали порогове число циклів навантаження (N_{th}) та число циклів навантаження до досягнення катастрофічного руйнування (N_p) труби, враховуючи особливості розвитку тріщини в заданому робочому середовищі.

За цією методикою здійснено розрахунок кінетики розвитку тріщиноподібних дефектів для магістральних нафтопроводу „Дружба”, виготовленого зі сталі 10Г2БТЮЗ, та „Долина – Дрогобич”, виготовленого із сталі 20, що експлуатувалися понад 40 років за максимального робочого тиску нафти $p = 4,1$ і $3,4$ МПа відповідно та коефіцієнта асиметрії циклу навантаження $R \approx 0,9$. У табл. 1 наведено хімічний склад досліджуваних сталей.

Таблиця 1 – Хімічний склад досліджуваних сталей

Сталь 10Г2БТЮЗ								
Масова доля елементів, %								
C	Mn	Si	V	Nb	Al	Ti	S_{max}	P_{max}
0,11	1,68	0,35	0,09	0,03	0,04	0,02	0,006	0,02
Сталь 20								
Масова доля елементів, %								
C	Mn	Si	Cu	Ni	Cr	As	S_{max}	P_{max}
0,19	0,48	0,29	0,23	0,25	0,24	0,08	0,040	0,035

Розглядали два найбільш характерні випадки форми початкових тріщин, які виявляються методами неруйнівного контролю при діагностичному огляді трубопроводів та підтверджені теоретичними розрахунками. Перший при $(c/a)_0 = 1/20$, що відповідає корозійному пошкодженню типу риски. Другий при $(c/a)_0 = 1/3$, що відтворює дефект у вигляді корозійної виразки.

Механічні характеристики сталей визначались за стандартною процедурою [15] випробувань циліндричних зразків на розтяг. Їх значення приведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Геометричні параметри труб та механічні характеристики сталей

Трубопровід	$D \times t$, мм	Сталь	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
„Дружба”	530 × 7	10Г2БТЮ3	583,3	438,9	25,6	64,3
„Долина – Дрогобич”	273 × 9	20	458,8	332,8	26,2	59,7

Результати обчислень представляли у вигляді табличних даних (табл. 3 та табл. 4) та графічних залежностей (рис. 2) зміни форми тріщини (c/a) при її розвитку в глибину (c/t) стінки труби нафтопроводу.

Таблиця 3 – Характеристики кінетики поширення півеліптичної тріщини у стінках магістрального нафтопроводу „Дружба”

Система	c_{th}/a_0	c_{th} , мм	N_{th} , цикли	N_p , цикли	$(c/a)_p$	$2a_p$, мм	$2a^*$, мм
Метал – дистильована вода	1/3	4,87	$4,30 \cdot 10^5$	$8,92 \cdot 10^5$	0,363	31,0	34,3
	1/20	4,17	$5,08 \cdot 10^5$	$9,72 \cdot 10^5$	0,065	170,0	172,8
Метал – ґрунтова вода	1/3	4,65	$9,33 \cdot 10^6$	$1,54 \cdot 10^7$	0,372	30,3	33,7
	1/20	4,00	$6,50 \cdot 10^6$	$9,75 \cdot 10^6$	0,067	163,1	165,8

Таблиця 4 – Характеристики кінетики поширення півеліптичної тріщини у стінках магістрального нафтопроводу „Долина – Дрогобич”

Система	c_{th}/a_0	c_{th} , мм	N_{th} , цикли	N_p , цикли	$(c/a)_p$	$2a_p$, мм	$2a^*$, мм
Метал – дистильована вода	1/3	7,23	–	–	–	–	–
	1/20	6,95	$2,00 \cdot 10^6$	$2,87 \cdot 10^6$	0,052	278,3	282,3
Метал – ґрунтова вода	1/3	7,23	–	–	–	–	–
	1/20	6,85	$4,65 \cdot 10^6$	$7,55 \cdot 10^6$	0,052	274,7	278,5

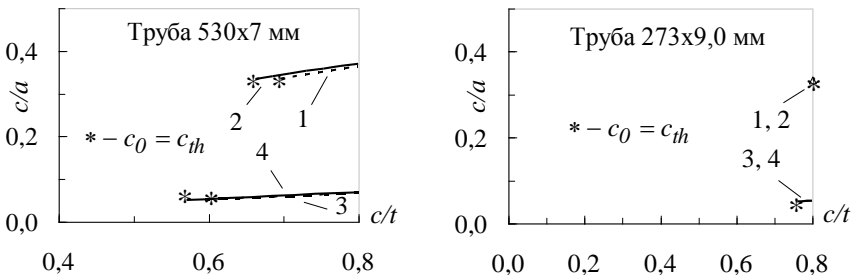


Рис. 2 – Зміна форми тріщини (c/a) з її розвитком у глибину стінки труби магістральних нафтопроводів „Дружба” (Коровичі – Жулин) і „Долина – Дрогобич” під час випробувань у дистильованій (1,3) та ґрунтовій (2,4) воді: 1,2– $(c/a)_0 = 1/3$; 3,4– $(c/a)_0 = 1/20$

Висновки. Встановлено, що потенційний розвиток субкритичних втомних тріщин по товщині стінки труби експлуатованого металу магістрального нафтопроводу „Дружба”, незалежно від форми початкового дефекту, є незначним і складає приблизно 25 % її товщини. Для магістрального нафтопроводу „Долина–Дрогобич” потенційний розвиток півеліптичної тріщини з початковою формою у вигляді виразки $((c/a)_0 = 1/3)$ по товщині стінки труби експлуатованого металу практично відсутній. Можливим є лише незначний розвиток тріщиноподібних дефектів з початковою формою у вигляді корозійної борозни $((c/a)_0 = 1/20)$ наприкінці експлуатаційного періоду.

БІБЛІОГРАФІЧНІ ПОСИЛАННЯ

1. **Андрейків О. Є.** Визначення залишкового ресурсу труби нафтопроводу з урахуванням наявних дефектів у її стінці і реальних умов експлуатації / О. Є. Андрейків, Р. М. Кушнір, О. Т. Цирульник // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин; під заг. ред. Б. Є. Патона. – К.: Вид-во інституту електрозварки ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. – С. 328–331.
2. **Андрейків А. Е.** Пространственные задачи теории трещин / А. Е. Андрейків. – К.: Наук. думка, 1982. – 345 с.
3. **Дмитрах І. М.** Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень / І. М. Дмитрах, В. В. Панасюк. – Львів: Вид-во фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України, 1999. – 341 с.
4. **Красовський А. Я.** 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, С. А. Радченко [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. 309–314.
5. **Красовський А. Я.** Трещиностойкость стальной магистральных трубопроводов / А. Я. Красовський, В. Н. Красико. – К.: Наук. думка, 1990. – 173 с.
6. **Лужецький В. С.** Оцінка характеристик опору поширення тріщин експлуатованого металу магістральних нафтогазопроводів у корозійних середовищах // В. С. Лужецький, Р. С. Грабовський // Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій: праці 1-ої Міжнародної науково-технічної конференції (22 – 24 жовтня 2008 р.). – Львів: КІНПАТРІ ЛТД, 2008. – С. 58–60.
7. **Мелехов Р. К.** Конструкційні матеріали енергетичного обладнання / Р. К. Мелехов, В. І. Похмурський. – К.: Наук. думка, 2003. – 374 с.
8. Механіка руйнування і міцність матеріалів: [довідн. посібн. у 12 т.] / під заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 7. Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування / під ред. І. М. Дмитраха. – К.: Вид-во “Академперіодика”, 2005. – 378 с.
9. **Ориняк І. В.** Ресурс, довговічність і надійність трубопроводів. Огляд сучасних підходів і проблем нормативного забезпечення в Україні / І. В. Ориняк, В. В. Розгонюк, В. М. Тороп, С. Ф. Білик // Нафтова і газова промисловість. – 2003. – № 4. – С. 54–57.
10. **Панасюк В. В.** Механіка квазіхрупкого руйнування матеріалів / В. В. Панасюк. – К.: Наук. думка, 1991. – 416 с.
11. **Похмурський В. И.** Коррозионная усталость металлов / В. И. Похмурський. – М.: Металлургия, 1985. – 206 с.
12. **Саврук М. П.** Двумерные задачи упругости для тел с трещинами / М. П. Саврук. – К.: Наук. думка, 1981. – 324 с.
13. **Трощенко В. Т.** Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении / В. Т. Трощенко. – К.: Наук. думка, 1981. – 344 с.
14. **Фридман Я. Б.** Механические свойства металлов. Механические испытания. Конструкционная прочность: [в 2 т.] / Я. Б. Фридман. – М.: Машиностроение, 1974. – Т. 2. – 368 с.

15. **Marcus P.** Localized corrosion (pitting): A model of passivity breakdown including the role of the oxide layer nanostructure / P. Marcus, V. Maurice, H. H. Strehblow // Corrosion Science. – 2008. – Vol. 50, Is. 9, September. – P. 2698–2704.
16. **Marcus P.** On some fundamental factors in the effect of alloying elements on passivation of alloys / P. Marcus // Corrosion Science. – 1994. – Vol. 36, Is. 12. – P. 2155–2158.
17. **Murakami Yu.** Handbook of stress intensity factors / Yu. Murakami // Pergamon Press, Oxford (UK). – 1987. – 1011 p.
18. **Parkins R. N.** Predictive approaches to stress corrosion cracking failure / R. N. Parkins // Corrosion Science. – 1980. – Vol. 20, Is. 2. – P. 147–166.
19. **Parkins R. N.** The application of stress corrosion crack growth kinetics to predicting lifetimes of structures / R. N. Parkins // Corrosion Science. – 1989. – Vol. 29, Is. 8. – P. 1019–1038.

В. С. Лужецкий, канд. техн. наук, О. М. Лепак

ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ КИНЕТИКИ РОСТА КОРРОЗИОННО-УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В СТЕНКАХ ТРУБОПРОВОДОВ

Сделаны численные оценки развития полуэллиптических коррозионно-усталостных трещин в трубопроводе в зависимости от формы имеющихся начальных дефектов для различных систем “материал – среда”. Показано, что начальная форма дефекта всегда влияет на кинетику его дальнейшего распространения вглубь стенки.

Ключевые слова: трубопровод длительной эксплуатации, коррозионно-усталостный дефект, трещиноподобный дефект, кинетика роста трещины, коэффициент интенсивности напряжений.

V. Luzhetsky, Associate Professor, O. Lepak

NUMERICAL-ANALYTIC ESTIMATION OF KINETICS GROWTH OF CORROSION-FATIGUE CRACKS IN PIPELINE WALLS

Numerical estimation of semielliptical corrosion-fatigue cracks growth in a pipeline of power generating units have been done in dependence of existed initial defects shape for different systems “material – environment”. It is shown that initial shape of the defect always influences the kinetics of its further spread in wall depth.

Keywords: long operated pipeline, corrosion-fatigue defect, crack-like defects, kinetics of crack growth, stress intensity factor.

Technical diagnostics of responsible constructions exploited in conditions of combined power load and corrosive aggressive media is actual scientific and technical problem, particularly, for definition of long-term exploitation objects. Pipes, used for oil production and transportation, are in constant contact with corrosive and deleterious substances which cause intensive internal corrosion of pipes, whereas their abrasion is accompanied with great material losses and severe ecological consequences.

The method for numerical estimation of kinetics and shape evolution of crack-like defects during their propagation in pipe wall was developed for conditions of fatigue and corrosion fatigue mechanisms of fracture. On this base, the regularities of fatigue crack growth in the walls of trunk oil pipelines were determined in dependence of crack's initial shape and depth and also with taking into account the influence of operating time and composition of corrosive environment on corrosion fatigue fracture behaviour of pipeline materials [1–5].

Our research object, thus, is processes of formation and development of fissuring defects in pipe walls, and the influence of their forms and sizes on a pipe's working capacity.

Calculations performed for the used metals (steel 10Г2БТЮ3, $\sigma_{0,2} = 438.9$ mPa, $d_{ext} = 530$ mm, $t = 7$ mm) of oil pipeline "Druzhba" and "Dolyna – Drohobych" (steel 20, $\sigma_{0,2} = 332,8$ mPa, $d_{ext} = 273$ mm, $t = 9$ mm), which operated at the sinusoidal form of loading cycle ($R \approx 0.9$).

They have been tested in distilled water (pH 6.7), as well as in 0.1 % NaCl solution (pH 6.5), which served as a soil water model.

Mechanical characteristics of steel have been defined after a standard testing procedure of cylindrical samples for extension.

Numerical estimation of semielliptical corrosion fatigue cracks growth behavior in feeding pipeline of power generating units have been done in dependence of shape of existed initial defects (corrosion ulcer and corrosion furrow) for different systems "material – environment". It is shown that water corrosive environments (ground and distilled water) substantially influence on the process of distribution of fatigue crack in the probed steels. For trunk oil pipelines the calculations of potentially critical defects were also made in dependence of their location on the pipeline route.

REFERENCES

1. **Marcus P.** Localized corrosion (pitting): A model of passivity breakdown including the role of the oxide layer nanostructure / P. Marcus, V. Maurice, H. H. Strehblow // Corrosion Science. – 2008. – Vol. 50, Is. 9, September. – P. 2698–2704.
2. **Marcus P.** On some fundamental factors in the effect of alloying elements on passivation of alloys / P. Marcus // Corrosion Science. – 1994. – Vol. 36, Is. 12. – P. 2155–2158.
3. **Murakami Yu.** Handbook of stress intensity factors / Yu. Murakami // Pergamon Press, Oxford (UK). – 1987. – 1011 p.
4. **Parkins R. N.** Predictive approaches to stress corrosion cracking failure / R. N. Parkins // Corrosion Science. – 1980. – Vol. 20, Is. 2. – P. 147–166.
5. **Parkins R. N.** The application of stress corrosion crack growth kinetics to predicting lifetimes of structures / R. N. Parkins // Corrosion Science. – 1989. – Vol. 29, Is. 8. – P. 1019–1038.

*Дрогобицький державний педагогічний університет
ім. Івана Франка,
Дрогобич, Україна*

Надійшла до редколегії 12.12.2012