

УДК 620.178.3:539.3:620.194

ВПЛИВ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ГАЗОПРОВОДУ НА ЦИКЛІЧНУ ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ СТАЛІ 17Г1С

Є. В. ХАРЧЕНКО^{1,2}, С. КЛИШ^{1,3}, В. М. ПАЛЮХ²,
О. Є. КУНТА², Т. М. ЛЕНКОВСЬКИЙ⁴

¹ Вармінсько-Мазурський університет в Ольштині, Польща;

² Національний університет "Львівська політехніка";

³ Технічний інститут льотних військ, Варшава, Польща;

⁴ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Встановлено закономірності поширення тріщини за низько-, середньо- та високо-амплітудних циклічних навантажень розтягом сталі 17Г1С труби магістрального газопроводу "Дашава–Мінськ" після 40 років експлуатації та матеріалу неексплуатованої (вихідної) труби. Побудовано кінетичні діаграми втомного руйнування за різних асиметрій циклу навантаження в діапазоні швидкостей росту втомної тріщини до 6 порядків. Досліджено припорогові ділянки кінетичних діаграм для матеріалу різних ділянок стінки вихідної та експлуатованої труб. На основі побудованих графічних залежностей визначено характеристики циклічної тріщиностійкості сталі 17Г1С та встановлено суттєве зменшення порогових значень коефіцієнта інтенсивності напружень експлуатованого матеріалу порівняно з вихідним внаслідок деградації його структури і зниження опірності втомному руйнуванню.

Ключові слова: газопровід, сталь 17Г1С, тривала експлуатація, кінетична діаграма втомного руйнування, характеристики циклічної тріщиностійкості, асиметрія циклу навантаження, порогове значення коефіцієнта інтенсивності напружень, деградація матеріалу.

Умови експлуатації сталей в магістральних нафто- та газопроводах досить специфічні. Крім робочого тиску в межах 5...20 МПа прокачаного продукту і пов'язаних з цим високих номінальних напружень, на безвідмовну експлуатацію матеріалу труб впливають випадкові динамічні навантаження, різноманітні дефекти в матеріалі, які є концентраторами напружень, корозивно-активне середовище як всередині, так і ззовні труби, та інші чинники, що призводять до деградації матеріалу та його втомного руйнування [1–3]. Відомо, що на ділянках локалізації напружень у матеріалі трубопроводу відбувається зародження та ріст втомних тріщин (РВТ). Тому для коректної оцінки роботоздатності магістральних нафто- та газотрубопроводів, насамперед необхідно коректно встановити властивості трубних сталей, які визначають їх опірність РВТ [4]. Виходячи з умов експлуатації трубопроводів, важливо встановити характеристики циклічної тріщиностійкості (ЦТ) сталей, які необхідні для прогнозування залишкового ресурсу трубопроводів та ранжування трубних сталей за опірністю втомному руйнуванню. З огляду на це, технічна діагностика металу трубопроводів, які використовують для видобутку і транспортування нафти чи газу в умовах сумісної дії корозивно-агресивного середовища та циклічних навантажень є актуальною науково-технічною задачею, вирішення якої значно зменшить матеріальні збитки та екологічні наслідки [5] спонтанного руйнування нафто- та газотранспортних трубних систем. Мета цієї роботи – дослідити характеристики ЦТ трубної сталі 17Г1С у

вихідному та експлуатованому стані за різних асиметрій циклу навантаження, а також зміну цих характеристик для внутрішньої та зовнішньої ділянок стінки труби.

Обладнання та методика досліджень. Зразки (рис. 1а) для випробувань на ЦТ з розмірами (mm): $L_1 = 150$; $L = 50$; $b = 15$; $h = 2$; $e = 0,2$; $t = 2,5$ вирізали за схемою (рис. 1b) з експлуатованої упродовж 40 років труби магістрального газопроводу “Дашава–Мінськ” на ділянці Комарнівського ЛВУ МГ, а також з труби запасу, виготовленої на Челябінському трубопрокатному заводі зі сталі 17Г1С з механічними характеристиками $\sigma_{0,2} = 430$ МПа, $\sigma_B = 630$ МПа, $S_k = 1840$ МПа, $\delta_{10} = 16\%$, $\psi = 65\%$, які визначали за методикою [6, 7] згідно з стандартом [8] на зразках, вирізаних з ділянки 3 (рис. 1b). Для циклічного навантаження зразків за асиметрій циклу $R = 0,2$, $R = 0,5$ та $R = 0,8$ використали установку Neckert EUS-20 з гідравлічним приводом, яка реалізує м’яке навантаження за синусоїдним циклом з частотою 15 Hz. За зародженням та поширенням тріщини слідкували за допомогою катетометра В-630 з точністю вимірювання 0,01 mm.

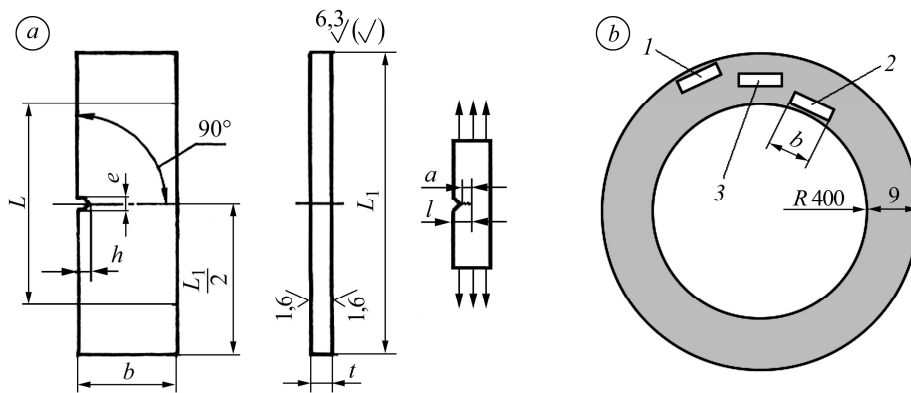


Рис. 1. Зразок з крайовою тріщиною для випробувань циклічним розтягом (а) та схема вирізання зразків з різних ділянок стінки труби (b): 1 – зовнішньої; 2 – внутрішньої; 3 – центральної.

Fig. 1. Specimen with an edge crack for testing under cyclic tension (a) and scheme of specimens cutting from different zones of the pipe wall (b): 1 – outside; 2 – inside; 3 – middle.

Коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) K у зразку з тріщиною обчислювали, згідно з методичними рекомендаціями [9], для діапазону відносних її довжин $0,05 \leq l/b \leq 0,70$ за розрахунковою формулою

$$K = \frac{P}{t\sqrt{b}} \left[\sqrt{\frac{l/b}{(1-l/b)^3}} \left(1,941 + 1,741l/b + 4,07(l/b)^2 - 2,528(l/b)^3 \right) \right],$$

де l – загальна довжина тріщини; P – зусилля навантаження зразка; b , t – ширина робочої частини та товщина зразка відповідно.

Під час зародження втомної тріщини у зразку забезпечували умову на обмеження максимальних нормальних напружень σ_{\max} в нетто січенні $\sigma_{\max} \leq 0,5\sigma_{0,2}$. Початкову тріщину абсолютної довжини $a \geq 2$ mm (рис. 1а), що відповідає $l/b \geq 0,27$, утворювали так, що швидкість РВТ не перевищувала швидкості на початку втомних випробувань. Далі зусилля навантаження зразка P змінювали, щоб забезпечити швидкість РВТ $V < 10^{-8}$ m/cycle для припорогової та $V = 10^{-8} \dots 10^{-5}$ m/cycle для середньо- та високоамплітудної ділянок кінетичної діаграми втомного руйнування (КДВР). Під час експерименту реєстрували зусилля навантаження зразка P , кількість циклів навантаження N та довжину втомної тріщини l . Швидкість поширення

тріщини визначали для кожного етапу як $V_i = dl_i / dN_i$, де dl – приріст довжини тріщини за dN циклів навантаження. На основі експериментальних результатів будували КДВР у вигляді залежностей “ $\log V - \log K_{\max}$ ”. Точки КДВР апроксимували лініями. З побудованих КДВР визначали характеристики ЦТ, а саме: порогове значення КІН K_{th} , що відповідає K_{\max} за швидкості РВТ $V = 10^{-10}$ m/cycle; характеристику K_{1-2} , яка вказує на початок середньоамплітудної ділянки КДВР; а також K^* за швидкості РВТ $V = 10^{-7}$ m/cycle. Середньоамплітудну ділянку КДВР апроксимували рівнянням Періса. Під час експерименту встановлювали період зародження втомної макротріщини для різних ділянок стінки труби. Цей період визначали як кількість циклів N_* до зародження втомної тріщини довжиною $a = 1$ mm у зразку за максимальних напружень циклу $\sigma_{\max} = 180$ МПа.

Результати досліджень та їх обговорення. На основі експериментальних результатів побудували КДВР (рис. 2) сталі 17Г1С з центральної ділянки стінки вихідної та експлуатованої труб за різних асиметрій циклу навантаження для швидкостей РВТ у діапазоні 6 порядків.

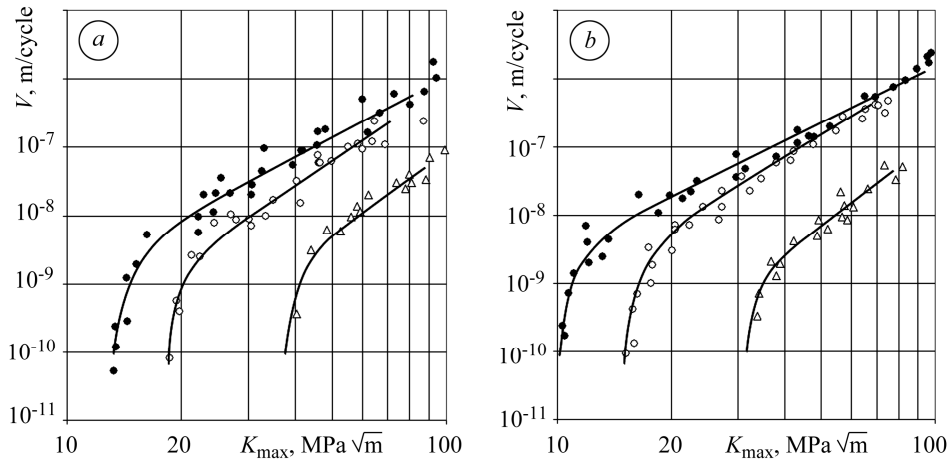


Рис. 2. Кінетичні діаграми втомного руйнування сталі 17Г1С вихідної (а) та експлуатованої (б) труб за $R = 0,2$ (●), $R = 0,5$ (○) та $R = 0,8$ (△).

Fig. 2. Fatigue crack growth rates curves of 17Г1С steel of non-operated (a) and operated (b) pipe at $R = 0.2$ (●), $R = 0.5$ (○) and $R = 0.8$ (△).

КДВР подібні за формою і характеризують зміну швидкості поширення втомної тріщини для діапазону $K_{\max} = 10 \dots 100$ МПа \sqrt{m} . На них розрізняємо низько- (припорогову), середньо- та високоамплітудну ділянки. Припорогові ділянки як для вихідного, так і для експлуатованого станів матеріалу лежать в межах швидкостей $V = 10^{-11} \dots 10^{-8}$ m/cycle, високоамплітудні – характеризують швидкість РВТ для $K_{\max} \geq 80$ МПа \sqrt{m} . Спостерігаємо суттєвий вплив асиметрії циклу навантаження на розташування графічних залежностей. Зростання значення R суттєво зсуває КДВР вправо у сторону більших значень K_{\max} , а також переміщує точку загину середньоамплітудної (прямолінійної) ділянки діаграм донизу в сторону менших значень V як для вихідного, так і для експлуатованого матеріалів. Слід зазначити, що цей вплив посилюється зі зростанням значення R , тобто при переході від $R = 0,5$ до $R = 0,8$ він більший, ніж від $R = 0,2$ до $R = 0,5$. Характеристики ЦТ, а також параметри рівняння Періса для середньоамплітудних ділянок, визначені на основі цих КДВР, подані в табл. 1. Зі збільшенням асиметрії циклу навантаження від $R = 0,2$ до $R = 0,8$ порогове значення КІН K_{th} зростає майже в три рази з 13,4 до 38,0 МПа \sqrt{m} для вихідного і з 10,3 до 32,0 МПа \sqrt{m}

для експлуатованого матеріалу. Характеристика K^* зростає більше ніж у два рази з 46 до $100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ та з 38 до $95 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, відповідно. Параметр n , який характеризує кут нахилу середньоамплітудної ділянки КДВР, зростає відповідно на 42 та 46%, що вказує на зменшення нахилу діаграм зі збільшенням значення R .

Таблиця 1. Характеристики ЦТ сталі 17Г1С з центральної ділянки стінки труби

R	Характеристики ЦТ			Параметри рівняння Періса	
	K_{th}	K_{1-2}	K^*	$C,$ $(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^{-n} \times \text{m/cycle}$	n
	$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$				
0,2	13,4 / 10,3	24 / 19	46 / 38	$1,22 \cdot 10^{-12} / 3,75 \cdot 10^{-12}$	2,97 / 2,81
0,5	18,8 / 15,2	30 / 24	57 / 46	$2,82 \cdot 10^{-14} / 1,26 \cdot 10^{-13}$	3,73 / 3,56
0,8	38,0 / 32,0	52 / 41	100 / 95	$3,69 \cdot 10^{-16} / 7,98 \cdot 10^{-16}$	4,22 / 4,10

Примітка: в чисельнику вказані значення для матеріалу вихідної, а в знаменнику – для експлуатованої труби.

Щоб встановити найчутливішу характеристику до деградації структури сталі 17Г1С і визначальну для оцінювання зниження опірності крихкому руйнуванню, а також відповідну асиметрію циклу навантаження R , на основі результатів (табл. 1) будували гістограми (рис. 3), які визначають коефіцієнт β – параметр відношення характеристики ЦТ експлуатованого матеріалу до аналогічної для вихідного.

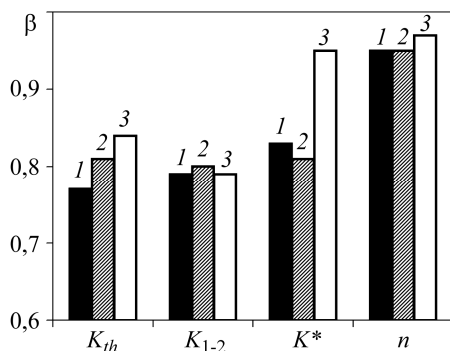


Рис. 3. Гістограма зміни характеристик циклічної тріщиностійкості сталі 17Г1С за різних асиметрій циклу навантаження внаслідок експлуатації газового трубопроводу: 1 – $R = 0,2$; 2 – $R = 0,5$; 3 – $R = 0,8$.

Fig. 3. Histogram of crack growth resistance characteristics changes of 17Г1С steel at different stress ratio due to long-term operation of gas pipeline: 1 – $R = 0,2$; 2 – $R = 0,5$; 3 – $R = 0,8$.

Таблиця 2. Характеристики ЦТ сталі 17Г1С за асиметрії циклу навантаження $R = 0,2$

Ділянка вирізання зразків (див. рис. 1b)	Порогове значення КІН $K_{th}, \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$	Період зародження тріщини $N_* \times 10^{-3}, \text{cycles}$
1	12,3 / 10,1	187 / 171
2	12,9 / 9,8	205 / 168
3	13,4 / 10,3	–

Примітка: в чисельнику вказані значення для матеріалу вихідної, а в знаменнику – для експлуатованої труби.

ная ($R = 0,2$), приймаємо за визначальну характеристику при оцінюванні зниження опірності крихкому руйнуванню сталі 17Г1С внаслідок тривалої експлуатації труби. Припорогові ділянки КДВР сталі 17Г1С з різних ділянок стінки (див. рис. 1b) вихідної та експлуатованої труб, подано на рис. 4.

Як видно з гістограми, коефіцієнт β за асиметрії циклу навантаження $R = 0,2$ для K_{th} набуває найменшого значення, а саме $\beta_{th} = 0,77$. З таких міркувань, порогове значення КІН K_{th} , визначене за низької асиметрії циклу навантаження

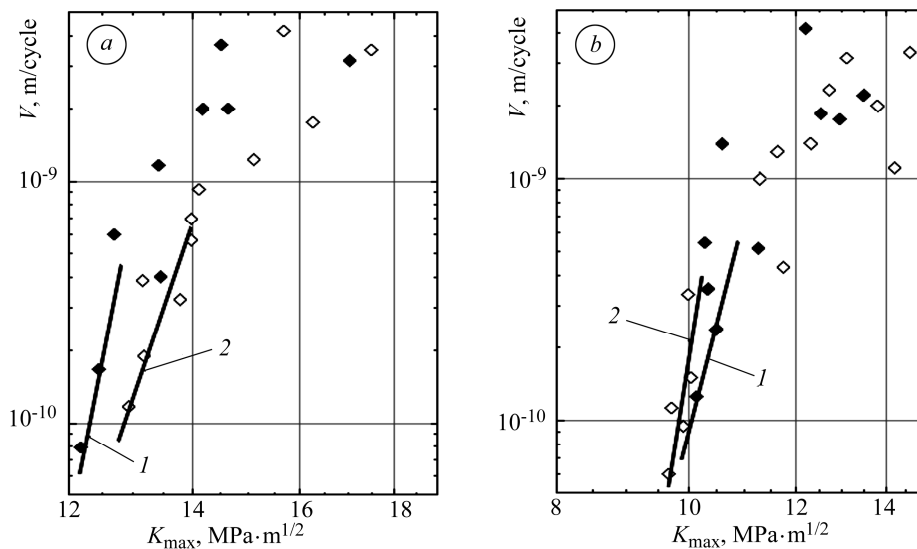


Рис. 4. Припорогові ділянки кінетичних діаграм втомного руйнування сталі 17Г1С з ділянок 1 та 2 стінки (див. рис. 1b) вихідної (a) та експлуатованої (b) труб.

Fig. 4. Near-threshold region of fatigue crack growth curves of 17Г1С steel from zones 1 and 2 of the wall (see Fig. 1b) in non-operated (a) and operated (b) pipe.

Як бачимо, опірність матеріалу РВТ для різних ділянок стінки труби не однакова, і для вихідного стану труби цей ефект проявляється сильніше, ніж для труби після експлуатації. В табл. 2 подано визначальні характеристики ЦТ для різних ділянок стінки вихідної та експлуатованої труб, а також період зародження тріщини. Одержані результати вказують на те, що внаслідок тривалої експлуатації матеріал зовнішніх шарів стінки труби деградує менше, ніж внутрішніх, незважаючи на нижчий рівень напружень в останніх. Це підтверджується пониженням порогових значень КІН K_{th} на 18 та 24% відповідно, а також зниженням періоду зародження тріщини N_* на 9 та 18%. Отримані результати добре корелюють з відомими [10, 11]. Для пояснення таких тенденцій необхідно вивчити мікромеханізми втомного руйнування, структурних перетворень та механіку накопичення мікропошкоджень в об'ємах матеріалу під час експлуатації трубопроводів. Для цього потрібні додаткові фракто- та металографічні дослідження, а також оцінювання електрохімічної ситуації біля вершини тріщини.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що зі збільшенням коефіцієнта асиметрії циклу навантаження циклічна тріщиностійкість сталі 17Г1С за низько- та середньоамплітудних навантажень підвищується як для матеріалу вихідної труби, так і для матеріалу після 40 років експлуатації. Показано, що найчутливішою характеристикою як до асиметрії циклу навантаження, так і до структурної деградації сталі 17Г1С є порогове значення коефіцієнта інтенсивності напружень, яке внаслідок тривалої експлуатації трубопроводу знижується на 16...23% залежно від співвідношення мінімального та максимального коефіцієнтів інтенсивності напружень в циклі навантаження. Встановлено, що з точки зору опірності втомному руйнуванню найміцнішим є матеріал центральної ділянки стінки газопроводу.

РЕЗЮМЕ. Установлены кинетические закономерности распространения трещины при низко-, средне- и высокоамплитудных циклических нагрузках растяжением стали 17Г1С трубы магистрального газопровода “Дашава–Минск” после 40 лет эксплуатации и неэксплуатированной (исходной) трубы. Построены кинетические диаграммы усталостного разрушения при разных асимметриях цикла нагружения в диапазоне скоростей роста

усталостной трещины до 6 порядков. Исследованы припороговые участки кинетических диаграмм усталостного разрушения материала разных зон стенки исходной и эксплуатированной трубы. На основе построенных графических зависимостей определены характеристики циклической трещиностойкости и выявлено существенное снижение пороговых значений коэффициента интенсивности напряжений эксплуатированного материала в сравнении с исходным, что объясняется деградацией его структуры и снижением сопротивляемости хрупкому разрушению.

SUMMARY. Kinetic regularities of crack propagation at low, medium and high-amplitude cyclic tension loading of 17Г1С steel taken from the pipeline “Dashava–Minsk” after 40 years of operation and non-operated (original) pipes were established. Kinetic curves of fatigue fracture at various stress ratios of a loading cycle in the range of fatigue crack growth rates, in the range of up to 6 orders of magnitude were constructed. The near-threshold regions of fatigue fracture curves of the material of different zones of the original and operated pipe wall were investigated. On the base of the obtained dependences the fatigue crack growth resistance characteristics were evaluated and a significant reduction in the threshold stress intensity factor of operated material in comparison with the original was found due to the degradation of its structure and decrease of brittle fracture resistance.

1. *Абдуллин И. Г., Гареев А. Г., Мостовой А. В.* Коррозионно-механическая стойкость нефтегазовых трубопроводных систем: диагностика и прогнозирование долговечности. – Уфа: Гилем, 1997. – 178 с.
2. *Оцінка довговічності труби нафтогону з поверхневою тріщиною під двовісним блочним навантаженням / О. С. Андрейків, Я. Л. Іваницький, З. О. Терлецька, М. Б. Кіт // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – 40, № 3. – С. 103–108.*
(*Andreikiv O. E., Ivanyts'kyi Ya. L., Terlets'ka Z. O., Kit M. B.* Evaluation of the durability of a pipe of oil pipeline with surface crack under biaxial block loading // *Materials Science. – 2004. – 40, № 3. – P. 408–415.*)
3. *Winston Revie R.* Oil and Gas Pipelines: Integrity and Safety Handbook. – New Jersey: John Wiley & Song Publ., Hoboken, 2015. – 856 p.
4. *Carpinteri A.* Handbook of Fatigue Crack Propagation in Metallic Structures. – Amsterdam: Elsevier Science, 1994. – 856 p.
5. *Мазур И. И., Иванцов О. М., Молдаванов О. И.* Конструктивная надежность и экологическая безопасность трубопроводов. – М.: Недра, 1990. – 264 с.
6. *Мольков Ю. В.* Застосування методу цифрової кореляції зображень до побудови діаграм деформування // *Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – 48, № 6. – С. 121–125.*
(*Mol'kov Yu. V.* Application of the method of digital image correlation to the construction of stress–strain diagrams // *Materials Science. – 2013. – 48, № 6. – P. 832–837.*)
7. *Визначення локальної деформації біля концентраторів напружень методом цифрової кореляції зображень / Я. Л. Іваницький, Ю. В. Мольков, П. С. Кунь, Т. М. Ленковський, М. Войтович // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – 50, № 4. – С. 8–24.*
(*Ivanyts'kyi Ya. L., Mol'kov Yu. V., Kun P. S., Lenkovs'kyi T. M., Wójtowicz M.* Determination of the local strains near stress concentrators by the digital image correlation technique // *Materials Science. – 2015. – 50, № 4. – P. 488–495.*)
8. *ГОСТ 1497-84.* Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Введ. 1986.01.01.
9. *РД 50-345-82.* Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 95 с.
10. *Peculiarities of the fatigue crack growth in 14MoV63 pipe steel after its service / О. Z. Student, V. Šijački-Zeravčić, I. D. Skrypnyk, H. M. Nykyforchyn, B. P. Loniuk // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1999. – 35, № 3. – С. 74–80.*
(*Student O. Z., Šijački-Zeravčić V., Skrypnyk I. D., Nykyforchyn H. M., Lonyuk B. P.* Distinctive features of fatigue crack growth in 14Mo V63 pipe steel after service // *Materials Science. – 1999. – 35, № 3. – P. 381–388.*)
11. *Осташ О. П., Вольдемаров О. В., Гладыш П. В.* Циклічна тріщиностійкість сталей тривало експлуатованих згинів парогонів // *Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – 48, № 4. – С. 14–24.*
(*Ostash O. P., Vol'demarov O. V., Hladysh P. V.* Cyclic crack resistance of the steels of bends of steam pipelines after long-term operation // *Materials Science. – 2013. – 48, № 4. – P. 427–437.*)

Одержано 05.08.2016