

УДК 620.178

П.Ясній<sup>1</sup>, докт.техн.наук; П.Марущак<sup>1</sup>; О.Вашенко<sup>2</sup>, докт.техн.наук

<sup>1</sup>Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

<sup>2</sup>Національний університет харчових технологій

## ВПЛИВ ЧАСТОТИ ТА ФОРМИ ЦИКЛУ НАВАНТАЖУВАННЯ НА ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНУ ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ ПОКРИТТЯ БІМЕТАЛЕВОГО РОЛИКА МБЛЗ

*Досліджено вплив частоти навантажування на тріщиностійкість матеріалу захисного шару ролика МБЛЗ - сталі 15X13MФ<sub>л</sub>. Характеристики тріщиностійкості досліджували із використанням силового  $\Delta K_{bi}$ , енергетичного  $\Delta J$  та деформаційного  $\Delta \delta$  підходів.*

*Зменшення частоти навантажування з 0,1 до 0,01 Гц зменшує швидкість поширення тріщини для значень  $\Delta K_{bi} < 26 \dots 28$  МПа  $\sqrt{м}$ . Короткотривала витримка при максимальному навантаженні протягом 10 сек зменшує швидкість росту втомної тріщини у 5-6 разів у порівнянні з трикутним циклом навантажування.*

Частота та форма циклу навантажування є одним з основних факторів, що визначають ресурс роботи конструкції на стадії поширення втомних тріщин в умовах високих температур.

Вплив частоти навантажування на швидкість росту тріщини в умовах втоми та втоми-повзучості досліджувався у багатьох працях, зокрема [1-4]. Вплив частоти навантажування на кінетику росту втомної тріщини (РВТ) залежить від розмаху пластичних деформацій у вершині тріщини, мікроструктури матеріалу, мікромеханізмів поширення тріщини [3]. Витримки при максимальному навантаженні можуть як прискорювати [4-6], так і сповільнювати розвиток тріщини в умовах втоми-повзучості [7], в залежності від особливостей взаємодії механізмів руйнування. Крім того, ефекти впливу частоти та витримки при максимальному навантаженні можуть бути пов'язані із зміною границі текучості складових біматеріалу при зростанні періоду активного навантажування.

Проте не достатньо вивчений вплив частоти навантажування та короткотривалої витримки на циклічну тріщиностійкість біметалевих матеріалів.

Метою даної роботи є дослідження впливу частоти та форми навантажування на швидкість поширення втомних тріщин у біматеріалі ролика МБЛЗ.

### Методика досліджень

Досліджували РВТ за однобічного розтягу призматичних біметалевих зразків з одностороннім надрізом, при температурі +600 °С, з коефіцієнтом асиметрії циклу

навантажування  $R = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} = 0$ , згідно з методикою [8] (тут  $P_{\min}$  та  $P_{\max}$  - відповідно

найменше та найбільше зусилля). Випробування проводили за симетричного трикутного ( $t_n = t_p$ ), та трапецевидного циклу із витримкою 10 с., при частоті навантажування 0,1 і 0,01 Гц. Тріщина поширювалась із зовнішнього захисного шару зі сталі 15X13MФ<sub>л</sub> у напрямку основного (тримкого) матеріалу ролика сталі 25X1M1Ф<sub>л</sub>.

Випробування при частоті 0,1 Гц, проводили на сервогідроліній випробувальній машині типу СТМ-100, частоту навантажування 0,01 Гц реалізовували на електромеханічній машині FP-100, модернізованій для циклічного навантажування [9,10].

Креслення біметалевих зразків, схема їх вирізання, та характеристики механічних властивостей сталей наведені у праці [11].

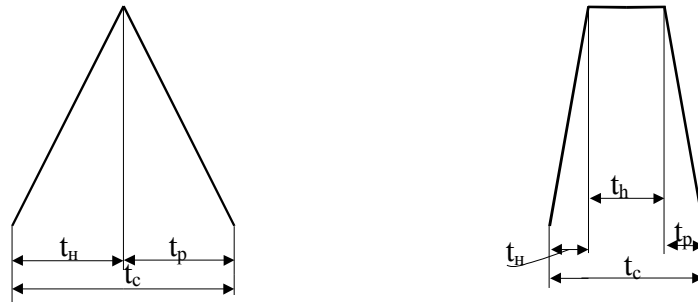


Рис. 1. Типові форми циклу навантажування ролика МБЛЗ

Вплив форми циклу навантажування на швидкість РВТ обумовлений насамперед зміною періоду активного навантажування та періодом витримки при максимальному навантаженні, тривалість якого впливає на процеси втоми-повзучості у вістрі тріщини.

Швидкість РВТ в біметалі від розмаху КІН описували рівнянням Періса:

$$\left(\frac{da}{dN}\right) = C \Delta K_{bi}^m, \quad (1)$$

де  $C$  та  $m$  - параметри матеріалу, що залежать від механічних властивостей;  $\Delta K_{bi}$  - розмах коефіцієнту інтенсивності напружень (КІН).

Формула визначення КІН біметалевого зразка із урахуванням модулів пружності наведена у праці [11].

Також використовували локальний критерій нелінійної механіки руйнування - розмах розкриття вершини тріщини  $\Delta\delta$ , основні методичні особливості визначення якого наведені у праці [8,11].

Швидкість поширення тріщини від  $\Delta\delta$  визначали за формулою:

$$\frac{da}{dN} = C_1 (\Delta\delta)^{m_1}, \quad (2)$$

де  $C_1$ ,  $m_1$  - сталі для даних умов випробувань.

В умовах високотемпературної втоми-повзучості застосовано два підходи до прогнозування впливу механізмів втоми та повзучості на швидкість РВТ, метод лінійного підсумовування пошкоджуваності [11]

$$\left(\frac{da}{dN}\right) = \left(\frac{da}{dN}\right)_f + \left(\frac{da}{dN}\right)_c. \quad (3)$$

та метод переважаючого механізму руйнування :

$$\left(\frac{da}{dN}\right) = \text{Max} \left[ \left(\frac{da}{dN}\right)_f, \left(\frac{da}{dN}\right)_c \right]. \quad (4)$$

Крім розмаху КІН, та розмаху розкриття вершини тріщини, для опису впливу частоти та витримки при максимальному навантаженні на швидкість РВТ використовували розмах  $\Delta J_f$  та  $\Delta J$  – інтегралу.

Швидкість РВТ при циклічному навантаженні,  $(da/dN)_f$  визначали за формулою [5]:

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_f = C_2 \cdot \Delta J_f^{m_2}, \quad (5)$$

де  $\Delta J_f$  - величина розмаху втомного  $J$  - інтеграла;

$m_2$  та  $C_2$  - відповідно стала матеріалу та функція часу навантаження.

Швидкість росту тріщини в умовах повзучості  $\left(\frac{da}{dN}\right)_c$  визначали аналогічним чином [5]:

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_c = C_3 \cdot \Delta J_c^{m_3}, \quad (6)$$

де  $m_3, C_3$  - сталі матеріалу.

Повзучість  $\dot{\epsilon}$  у вершині тріщини при трапецевидному циклічному навантажуванні описували рівнянням теорії старіння. Для визначення коефіцієнтів рівняння теорії старіння випробовували на повзучість гладкі зразки [12]. З метою зменшення кількості експериментів досліджували ділянки усталеної повзучості за умов ступінчатого наростання навантаження, відповідно до рекомендацій [13]:

$$\dot{\epsilon} = B \sigma^n, \quad (7)$$

де  $B$  - коефіцієнт,  $B=4,54 \cdot 10^{-28}, (1/c(\text{МПа})^n)$  (для сталі 15X13MФ<sub>л</sub>, при +600 °С);  $n$  - показник степеня,  $n=10,11$ .

Показник степеня  $\phi$ -ли (7) використовували для обчислення  $\Delta J_c$  у циклі навантаження [5]:

$$\Delta J_c = \frac{n-1}{n+1} \cdot \frac{S_p}{Bb},$$

де  $S_p$  - площа петлі зусилля – переміщення вздовж лінії дії сили, обумовлена повзучістю;

$B, b$  – величина відповідно товщини та нетто перерізу зразка.

Швидкість росту тріщини в умовах втоми-повзучості визначали за формулою:

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_f = C_4 \cdot \Delta J^{m_4}, \quad (8)$$

де  $\Delta J$  - величина розмаху  $J$  - інтеграла;

$m_4$  та  $C_4$  - відповідно показник степеня та стала матеріалу.

Величину розмаху  $J$  – інтегралу в умовах втоми-повзучості визначали як суму складових, обумовлених втомою та повзучістю [8]:

$$\Delta J = \Delta J_c + \Delta J_f. \quad (9)$$

Значення  $\Delta J_c, \Delta J_f$  обчислювали з допомогою програми “CREEP-FATIGUE” на основі методики [5,8].

### Аналіз впливу частоти навантаження

З аналізу залежностей  $\Delta K_{bi}-da/dN$  (рис.2 а) видно, що зменшення частоти навантаження приводить до зменшення швидкості РВТ у сталі 15X13MФ<sub>л</sub> для КІН  $\Delta K_{bi} < 24 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  і її збільшення при  $\Delta K_{bi} > 28 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ .

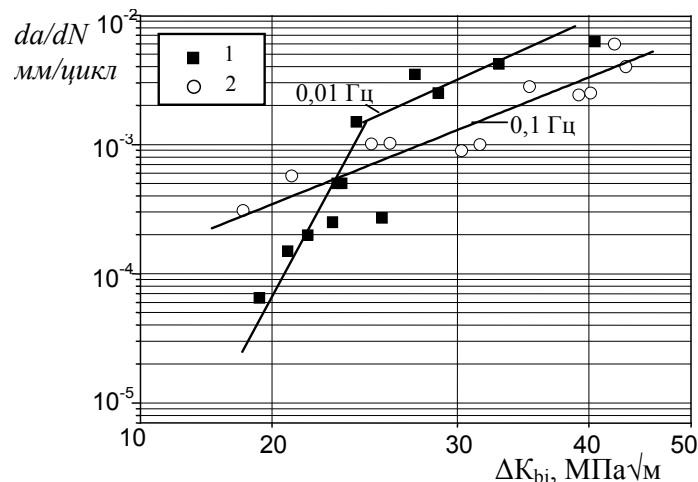


Рис. 2. Залежність швидкості РВТ у біметалевому зразку (сталь 15X13MФ<sub>л</sub>) при частоті 0,01Гц (1) та 0,1 Гц (2) від розмаху КІН

При  $\Delta K_{bi} \approx 26...28 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  частота навантаження майже не впливає на швидкість РВТ в сталі 15Х13МФ<sub>л</sub>.

На рис. 3 подані залежності швидкості РВТ в сталі 15Х13МФ<sub>л</sub> в залежності від розмаху  $\Delta J_f$  і розмаху розкриття вершини тріщини  $\Delta\delta$ .

Треба зазначити, що при частоті  $f=0,1$  так і при  $f=0,01$  Гц, в усьому діапазоні зміни  $\Delta K_{bi}$  при  $+600^\circ\text{C}$  ефект закриття тріщини був відсутній.

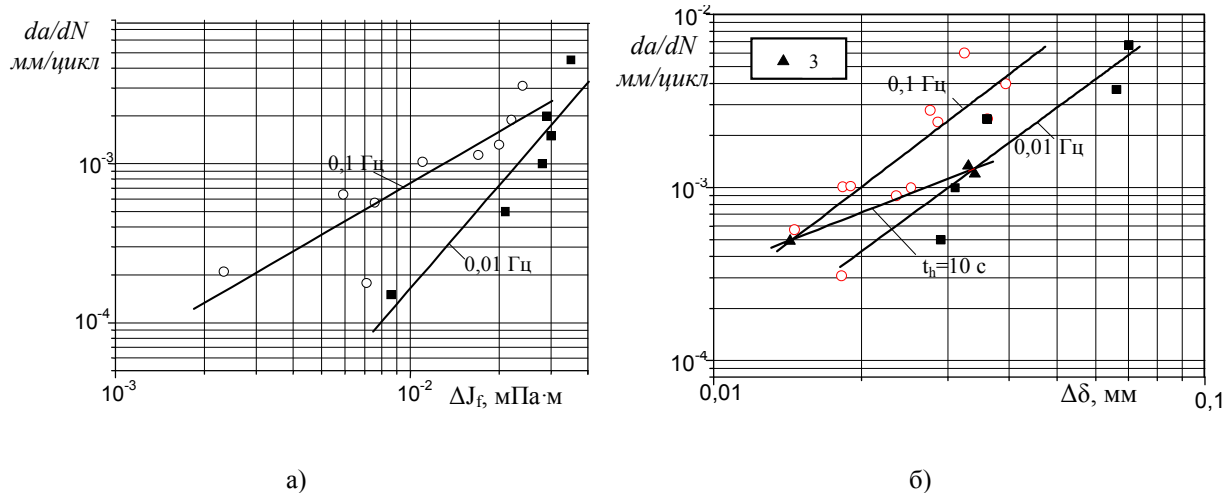


Рис. 3. Залежність швидкості при РВТ в сталі 15Х13МФ<sub>л</sub> при  $+600^\circ\text{C}$  від розмаху  $J_f$  - інтегралу - (а) та розмаху розкриття вершини тріщини  $\Delta\delta$  - (б) при частоті 0,1 Гц та 0,01 Гц (позн. див. рис. 2, витримка при максимальному навантажуванні - (3))

З наведених даних на рис.3. видно, що зменшення частоти навантаження від 0,01 Гц до 0,1 Гц істотно зменшує швидкість РВТ, при рівних значеннях  $\Delta J_f$ . Виявлено, що збільшення часу перебування зразка під дією активного навантаження приводить до збільшення розмаху розкриття вершини втомної тріщини, а також величини залишкового розкриття, яке, очевидно, обумовлено затупленням вершини тріщини.

На рис. 4 побудовані залежності розмаху розкриття вершини втомної тріщини від максимального КІН. Видно, що при переході від частоти 0,1 Гц, до 0,01 Гц, за однакових розрахункових значень КІН, величина розкриття  $\Delta\delta$  значно зростає.

З аналізу залежності розмаху розкриття вершини тріщини від розмаху  $J_f$  - інтегралу видно, що залежність між значеннями  $\Delta J_f \sim \Delta\delta$  не чутлива до частоти навантаження.

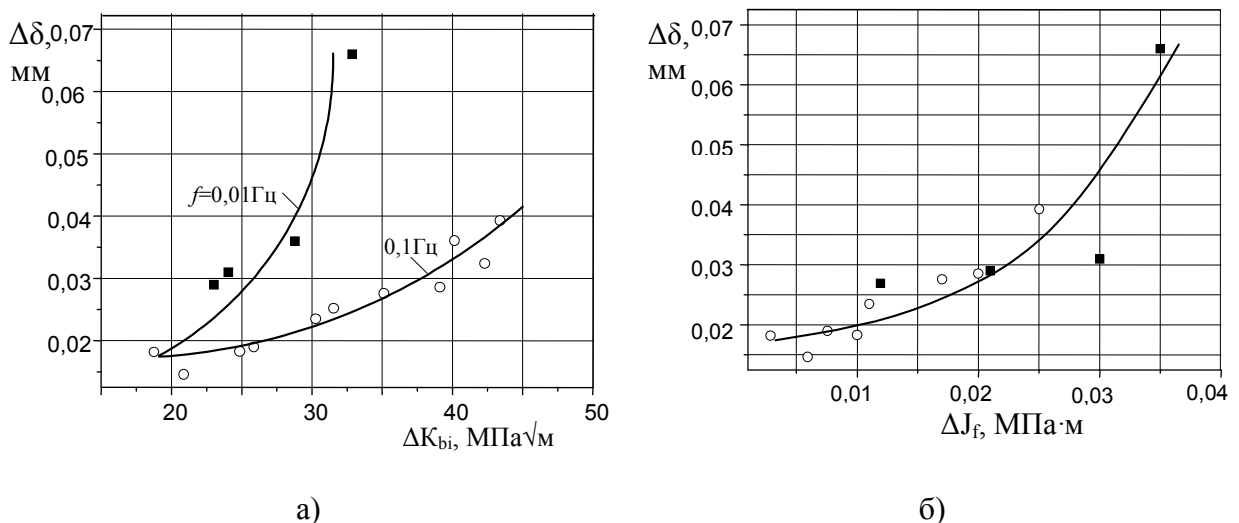


Рис. 4. Залежності розкриття вершини тріщини в сталі 15Х13МФ<sub>л</sub> від від розмаху КІН (а) та розмаху  $J_f$  - інтеграла (б), (позн. див. рис. 2)

### Вплив короткотривалої витримки при максимальному навантаженні в умовах високих температур на швидкість росту тріщини

На рис. 5 наведені залежності  $(da/dN - \Delta J)$ , отримані за умов короткотривалої витримки у циклі при максимальному навантаженні. На основі отриманих даних можна зробити висновок, що  $\Delta J_f$  може бути використаний для прогнозування швидкості РТ як в умовах втоми, так і в умовах втоми-повзучості при незначних періодах витримки при максимальному навантаженні.

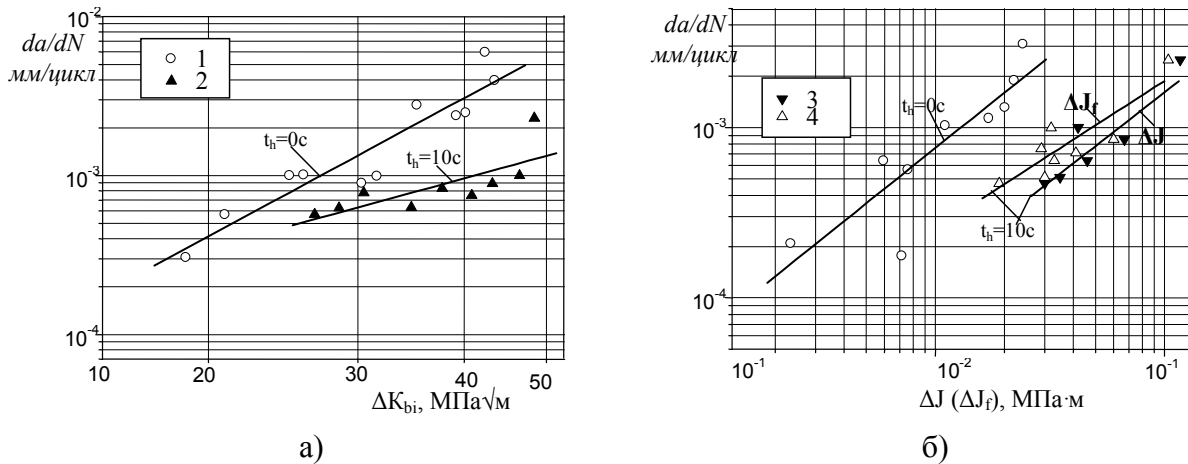


Рис. 5. Залежність швидкості росту тріщини втоми - повзучості в сталі 15X13MФ<sub>д</sub> при +600 °С  
 а) від розмаху  $\Delta K_{bi}$  (1- $t_h=0$  с; 2- $t_h=10$  с);  
 б) від розмаху J – інтегралу (4) та його втомної складової (3) при витримці 0 с та 10с

Виявлено, що величина переміщення повзучості  $\delta_c$  складає лише 3% від загального переміщення вздовж лінії дії сили циклу навантажування. Тобто більший вплив за даних умов має втомна складова, але складова повзучості помітно змінює кінетику поширення тріщини. І хоча при трапецевидному циклі навантаження спостерігалось збільшення розмаху пластичних деформацій у вершині тріщини втоми-повзучості, накопичення пластичності затуплює вершину тріщини і, як наслідок, зменшує швидкості її поширення.

Відомо [4], що зростання часу перебування під дією активного навантажування спричиняє ефекти, подібні отриманим у результаті деякої витримки при максимальному навантаженні, тому ефекти зменшення швидкості при короткотривалій витримці та частоті навантаження 0,01 Гц (рис. 3,4) добре узгоджуються один з одним.

Залежності  $\Delta J_f$  та  $\Delta J$  знаходяться у смузі розкиду. Протягом навантажування, при трапецевидному циклі, деформація повзучості накопичується у вершині тріщини як під час навантаження, так і витримки. Порівнюючи значення втомної складової розмаху J – інтегралу,  $\Delta J_f$  за трикутного та трапецевидного циклів, помітне значне зростання  $\Delta J_f$  для однакових швидкостей поширення тріщини, яке можна розглядати як необхідність прикладання більшої енергії для забезпечення однакової швидкості РТ. Сталі, використані для проведення обчислень, зведені у таблицю:

Таблиця 2

Значення сталих для першого шару біматеріалу 15X13MФ<sub>л</sub>/25X1M1Ф<sub>л</sub>

Сталь	$t_h, c$	$T_0, C$	$f, Гц$	Значення параметрів у ф-лах (1-4)					
				$da/dN-\Delta K_{bi}$ ф-ла (1)		$da/dN-\Delta J_f(\Delta J)$ ф-ла (5,8)		$da/dN-\Delta \delta$ ф-ла (2)	
				$C,$ $\frac{мм/цикл}{(МПа\sqrt{м})^m}$	$m$	$\frac{C_2}{C_4}$ $\frac{мм/цикл}{(МПа \cdot м)^{m_2}}$	$\frac{m_2}{m_4}$	$\frac{C_1}{мм^{m_1}}$ $\frac{мм/цикл}{мм^{m_1}}$	$m_1$
15X13MФ <sub>л</sub>	0	600	0,1	$8,97 \cdot 10^{-8}$	2,84	0,36	1,25	3,85	2,08
	0	600	0,01	$5,08 \cdot 10^{-6}$	1,92	4,28	2,15	2,21	2,05
	10	600	0,05	$4,93 \cdot 10^{-6}$	1,45	$\frac{0,023^*}{0,031}$	$\frac{1,02^*}{1,12}$	0,055	1,109

\*Числа у чисельнику належить до втомної складової розмаху  $J$ -інтегралу ( $\Delta J_f$ ) (ф-ла 5), у знаменнику до загального розмаху  $J$ -інтегралу ( $\Delta J$ ) (ф-ла 8).

### Висновки

Досліджено вплив частоти (0,1 та 0,01 Гц) на швидкість РВТ у сталі 15X13MФ<sub>л</sub> біметалевого зразка із використанням силових, деформаційних та енергетичних критеріїв механіки руйнування.

У координатах  $da/dN-\Delta K_{bi}$  для значень вище  $\Delta K_{bi} = 26,59$  МПа $\sqrt{м}$  при частоті 0,01 Гц спостерігалось значне (до 3-х разів) збільшення швидкості РВТ у порівнянні із даними, отриманими при 0,1 Гц.

У координатах  $da/dN-\Delta J_f$  та  $da/dN-\Delta \delta$  також спостерігається зменшення швидкості РВТ із збільшенням частоти навантажування.

Короткотривала витримка при максимальному навантаженні протягом 10 с у 5...6 разів зменшує швидкість поширення тріщини втоми-повзучості.

*Bimaterial notched prismatic specimens were tested under cyclical tension for different values of frequencies. Using fracture mechanics approaches to bimaterial specimens the force  $\Delta K_{bi}$ , energy  $\Delta J_f$  and deformation  $\Delta \delta$  characteristics of crack growth resistance have been evaluated. The results of tests and numerical calculations were presented as characteristics of fatigue crack growth rate. The decrease of the loading frequency from 0,1 to 0,01 Hz causes the decrease of the FCG rate for  $\Delta K_{bi} < 26...28$  MPa $\sqrt{m}$ . Tempering at +600 °C causes the decrease creep-fatigue crack growth rate in 5-6 times as compared with the triangle form of loading cycle.*

Робота виконана за рахунок бюджетних коштів Державного фонду фундаментальних досліджень, номер державної реєстрації (0101U006829).

### Література

1. Y. M. Baik, and K. S. Kim The combined effect of frequency and load level on fatigue crack growth in stainless steel 304 // International Journal of Fatigue.-2001.- Vol. 23.-P. 417-425.
2. Tong J., Byrne J. Effect of frequency on fatigue crack growth at elevated temperature. // Fatigue Fracture Engng. Mater. Struct., 1999.-Vol. 22.-P. 185-193.
3. G. Onofrio, G. A. Osinkolu, M. Marchionni Effects of loading waveform on fatigue crack growth of Udimet 720 Li superalloy // International Journal of Fatigue.-2004.- Vol. 26.- P. 203-209.
4. K. Kikuchi, T. Yokobori Jr., M. Futakawa, Y. Muto, T. Yokobori Holding time effects on crack initiation and growth in a notched specimen of Ni alloy // Journal of Jap. Soc. Strength and Fract. Materials.-1986.- Vol. 21.-№2.-P. 69-86.
5. Nakayama Y., Miura N., Takahashi Y., Date S., Shimakawa T., Toya Y. Development of fatigue and creep crack propagation law for 316FR stainless steel in consideration of FBR operating condition // Fatigue, Fracture, and High Temperature Design Methods in Pressure Vessel and Piping.- ASME. – 1998. - Vol. 365 - P. 191-198.
6. Merah N., T. Bui-Quoc, M. Bernard Creep-fatigue crack growth in notched SS-304 plates at 600°C // Engineering Fracture Mechanics.-1999.-Vol.63.-P. 39-55.

7. Im J. W., Won S. J., Kim M. J., Lim B. S. Creep-fatigue crack growth and creep rupture behavior in type 316 stainless steel-effect of hold time and aging treatment // International Journal of Automotive Technology.-2000.-№2.-P. 71-77.
8. Марущак П. О. Методика дослідження швидкості росту тріщини і опис кінетичних діаграм руйнування в умовах втоми-повзучості // Вісник Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя.-2003.-№2.- Том 8.- С. 23-28.
9. Ясній П. В., Марущак П. О. Автоматизований електромеханічний стенд для випробувань матеріалів в умовах втоми та втоми-повзучості // Вісник Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя.-2003.-№3.- Том 8.- С. 5-11.
10. Марущак П. О. Метод реалізації циклічного навантаження для електромеханічних випробувальних машин // Вісник Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя.-2004.-№1.- Том 9.- С. 16-21.
11. Ясній П. В., Марущак П. О. Вплив температури на швидкість росту тріщини у матеріалі покриття біметалевого ролика МБЛЗ // *Машинознавство.-2004.- (у друці).*
12. Annual Book of ASTM Standards. Standard Practice for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials.-1995.-E139.- ASTM.-Vol 3(1).- Philadelphia.
13. Takagi Y., Otsuki S., Ito T., Isamu N. Creep-fatigue properties of 2.25Cr-1Mo repair welds // OMMI.-2003.-Vol.2.-Issue 1.-P. 1-8.

*Одержано 26.05.2004 р.*