

## **МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКОСТІ РОСТУ ТРІЩИНИ І ОПИС КІНЕТИЧНИХ ДІАГРАМ РУЙНУВАННЯ В УМОВАХ ВТОМИ-ПОВЗУЧОСТІ**

*Запропоновано методику дослідження швидкості росту тріщин в умовах втоми-повзучості із використанням розмаху  $J$  - інтегралу. Методика ґрунтується на визначенні розмаху  $\Delta J$  - інтегралу та його складових, що описують ріст тріщини за умов дії механізмів втоми та повзучості.*

### **Вступ**

Більшість конструкцій, що експлуатуються з дефектами, при високих температурах зазнають руйнування внаслідок розвитку втомних тріщин. В цих умовах процеси повзучості істотно впливають на швидкість росту втомних тріщин. Для прогнозування швидкості росту тріщин втоми-повзучості необхідно, в першу чергу, мати експериментальні величини залежності швидкості росту тріщин в умовах втоми-повзучості від тих чи інших параметрів механіки руйнування.

Є праці, присвячені оцінці росту тріщин втоми-повзучості в умовах підвищених температур [1-5]. Так К.Nikbin [4] розробив методику оцінки впливу складової повзучості на швидкість росту тріщин із використанням  $C^*$  - інтеграла. N.Miura та N.Merah [1,5] у своїх роботах використовували розмах циклічного  $J$  - інтегралу, J.Granacher [6] запропонував залежність швидкості росту тріщини від розмаху коефіцієнту інтенсивності напружень (КІН).

Проте запропоновані методики мають певні обмеження до використання і залежать від умов роботи реальної конструкції.

Тому розробка методики дослідження швидкості росту втомної тріщини, обґрунтування параметрів, які враховують взаємний вплив втоми-повзучості, залишається актуальним завданням.

### **Методика дослідження швидкості росту тріщини**

В статті пропонується методика оцінки циклічної тріщиностійкості матеріалу ролика машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) з використанням підходів лінійної і нелінійної механіки руйнування. В якості параметра для опису швидкості росту тріщини використано енергетичний параметр - розмах  $J$ -інтеграла  $\Delta J$ . Для оцінки впливу втоми-повзучості на ріст тріщини в умовах високих температур використовували складові  $J$ -інтегралу, обумовлені втомою  $\Delta J_f$  та повзучістю  $\Delta J_c$ . Досліджували швидкість росту тріщини в ізотермічних умовах при температурах +20, 375, 600<sup>0</sup> С. Частота навантаження складала 0,01 та 0,1 Гц, коефіцієнт асиметрії циклу навантаження

$R = \frac{K_{\max}}{K_{\min}} = 0$ , тут  $K_{\min}$  та  $K_{\max}$  -відповідно найменший та найбільший КІН при циклічному навантаженні. Форма циклу навантаження трикутна та трапецевидна (рис. 1). Час витримки  $t_h = 10 \dots 100$  с.

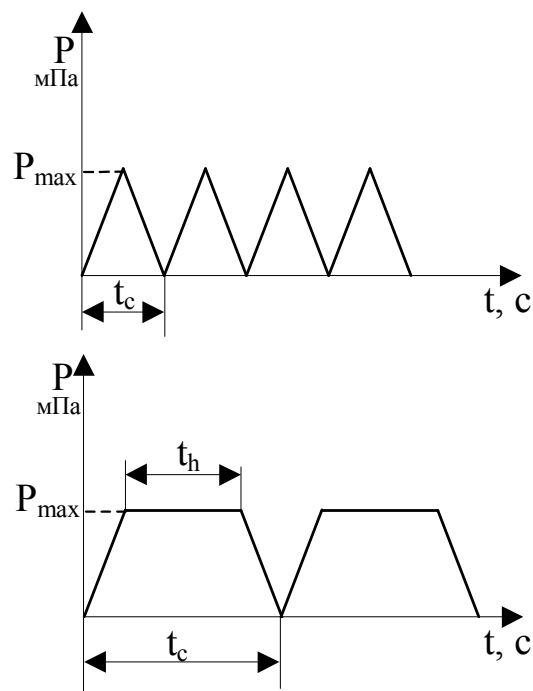


Рис. 1. Схема циклічного навантаження зразка з бічною тріщиною

Експеримент проводили з використанням модернізованої електромеханічної випробувальної машини FP 100 з найбільшим зусиллям 100 кН, із записом даних на ЕОМ, що дозволило здійснювати неперервне отримання та накопичення даних з інтервалом 10 вимірювань в секунду. Основна програма пакету дозволяє в режимі реального часу вивести результати експерименту на екран монітора ( режим осцилографа), а також у вигляді протоколу та роздрукувати поточні значення вимірюваних величин.

Дослідження проводили в термокамері (рис.2), яка забезпечує для даних зразків зону рівномірного нагрівання, довжиною 40 мм вздовж більшої осі та 25 мм вздовж поперечної осі зразка. Нагрівна спіраль 1 розміщена біля стінок термокамери 2, виконаних з керамічного матеріалу, що дозволяє зменшити втрати тепла та покращити рівномірність нагрівання зразка 3. Термокамера виконана із зйомною кришкою 4, яка ізолювана шаром азбесту 5. Вимірювання розкриття берегів тріщини виконували із використанням вимірювальних ніжок 6, тензOMETром 7. Система нагрівання забезпечує нагрівання зразків до заданої температури та підтримання температури з точністю 1 К [7].

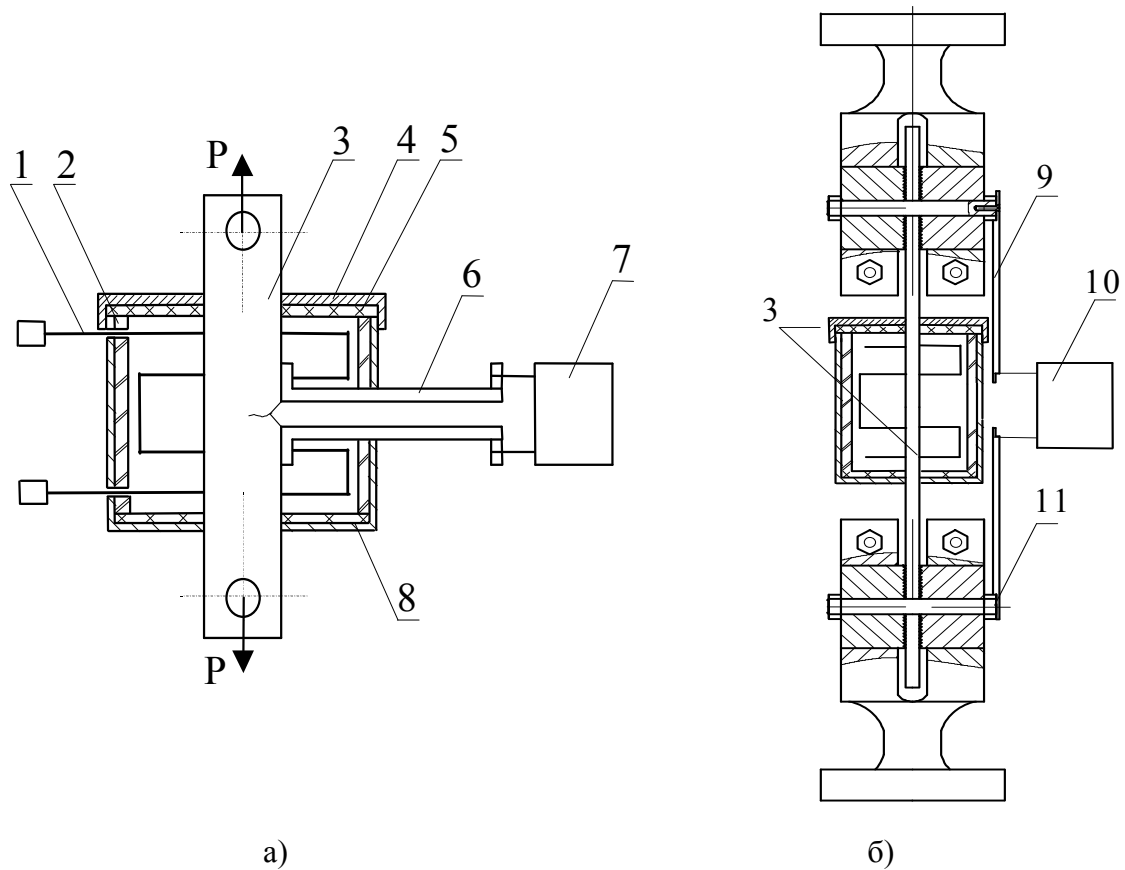
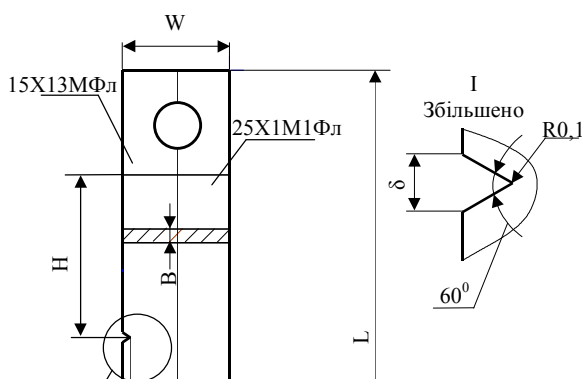


Рис. 2 Схема вимірювання лінійних переміщень за умов циклічного навантаження:  
 а) Схема вимірювання розкриття берегів тріщини;  
 б) Схема вимірювання переміщення вздовж лінії дії сили;  
 1-нагрівальна спіраль; 2-стінка нагрівальної камери; 3-зразок; 4-кришка термокамери;  
 5-шар теплоізоляції; 6-вимірювальні ніжки; 7-тензометр; 8- корпус термокамери;  
 9- вимірювальні ніжки; 10-тензометр; 11- болт

Переміщення вздовж лінії дії сили вимірювали із використанням вимірювальних ніжок 2, кріплення ніжок до болтів захоплювачів 4 здійснювали з допомогою гвинтів. На іншому кінці ніжок встановлювали тензометр. Таке кріплення дозволило використовувати вимірювальну систему як при кімнатній, так і при підвищеній температурі, оскільки при випробуванні в умовах високих температур тензометри винесені за межі термокамери.

Вирощування первинної втомної тріщини, а також дослідження швидкості її росту проводили відповідно до рекомендацій [8] в попередньо обміряних та розмічених зразках. Довжину тріщини визначали на поверхні з використанням мікроскопа типу МБС-9.



Таблиця

Основні геометричні розміри призматичного зразка з бічною тріщиною

Геометричні параметри зразка, мм			
W	B	L	a

25	5	200	
продовження таблиці			
<b>D</b>	$\delta$	<b>H</b>	<b>W<sub>1</sub></b>
12	2,5	50	12,5

Рис. 3 Схема біметалевого призматичного зразка з бічною тріщиною для дослідження на циклічну тріщиностійкість

Розроблені затискачі (рис.4) забезпечують жорсткий зв'язок між випробувальною машиною та зразком. Закріплення затискача на випробувальній машині здійснюється за допомогою восьми отворів для болтових з'єднань, які передбачені в основі вилки 1, фіксація зразка в захоплювачі здійснюється за допомогою двох шайб 2, на робочій поверхні яких виконані зубці (кільцеві канавки). З допомогою болтів 3 шайби жорстко фіксуються в отворах вилки.

Зусилля від машини до шайб передається через вилку. Всі деталі захоплювача виготовлені зі сталі 40Х гартованої до твердості 40 HRC.

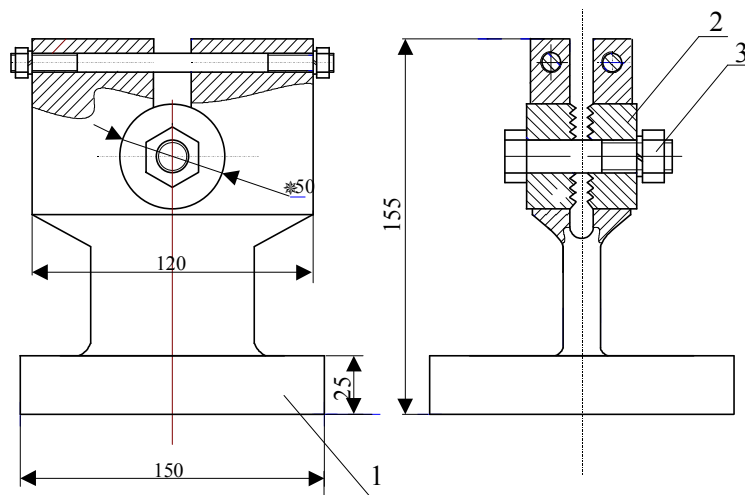


Рис. 4 Конструкція захоплювача для проведення випробувань призматичних зразків з бічним надрізом

Розмах коефіцієнту інтенсивності напружень для даного зразка визначається за формулою [2]:

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} F\left(\frac{a}{W}\right), \quad (1)$$

де  $\Delta P$  - розмах зусилля ;  
 $W$  - ширина зразка;  
 $B$  - товщина зразка;  
 $a$  - довжина тріщини.

Для зразка, який використовувався при випробуваннях (рис. 3)  $\frac{H}{W} = 2,0$

$$F\left(\frac{a}{W}\right) = \left(\frac{a}{W}\right)^{0,5} \cdot \left[ 1,99 - 0,41\left(\frac{a}{W}\right) + 1,87\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 38,5\left(\frac{a}{W}\right)^3 + \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right]. \quad (2)$$

Швидкість росту тріщини в умовах втоми можна подати залежністю Периса:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m, \quad (3)$$

де  $C$  та  $m$  - сталі матеріалу, що залежать від асиметрії циклу навантаження;  
 $\Delta K$  - розмах КІН.

Оскільки, згідно [6],  $\Delta K$  може бути використаний для опису швидкості росту тріщини із задовільною точністю лише при незначних розмірах пластичної зони у вершині тріщини, та для врахування ефектів повзучості використовують розмах  $J$  – інтегралу  $\Delta J$ . Тому швидкість росту тріщини в умовах втоми-повзучості,  $da/dN$  може бути подана у вигляді [1]:

$$\frac{da}{dN} = \left(\frac{da}{dN}\right)_c + \left(\frac{da}{dN}\right)_f \quad (4)$$

Швидкість росту втомної тріщини при циклічному навантаженні  $(da/dN)_f$  буде мати вигляд:

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_f = C_1 \cdot \Delta J_f^{m_1}, \quad (5)$$

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

$m_1$  та  $C_1$  - відповідно стала матеріалу та функція часу навантаження ;

Швидкість росту тріщини внаслідок впливу складової повзучості  $\left(\frac{da}{dt}\right)_c$  можна визначити за формулою:

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_c = C_2 \cdot \Delta J_c^{m_2}, \quad (6)$$

де  $m_2, C_2$  - стали матеріалу.

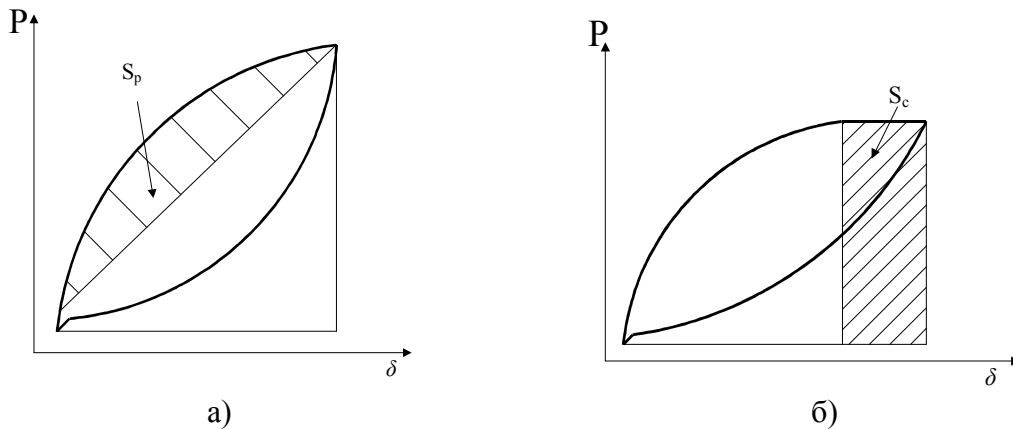


Рис. 5. Залежності переміщення вздовж лінії дії сили від величини навантаження для призматичного зразка з бічним надрізом: а) в умовах втоми; б) в умовах втоми-повзучості

На рис. 5 зображені типові петлі гістерезису в координатах “ $P - \delta$ ” за трикутної та трапецивидної форми циклу навантаження. Використання петель гістерезису дозволяє оцінити вплив окремих механізмів руйнування на величину  $\Delta J$ .

Розмах  $J$ - інтегралу  $\Delta J_f$  в умовах втоми-повзучості визначають за формулою [5]:

$$\Delta J = \Delta J_c + \Delta J_f, \quad (7)$$

де

$$\Delta J_f = \frac{\Delta K^2}{E} + \frac{S_p}{Bb}, \quad (8)$$

де  $E$  - модуль Юнга;

$S_p$  - площа під кривою  $P$ - $\delta$ , обумовлена втомою матеріалу (рис.5а)

$b = W - a$

$$\Delta J_c = \frac{n_c - 1}{n_c + 1} + \frac{S_c}{Bb}, \quad (9)$$

$n_c$  - показник степені в рівнянні повзучості Нортона;

$S_c$  - площа ділянки під кривою обумовлена повзучістю (рис.5б).

Рівняння Нортона для заданих умов випробувань має наступний вигляд [3]:

$$\dot{\epsilon} = A_c \sigma^{n_c}, \quad (10)$$

де  $A_c$  та  $n_c$  - відповідно коефіцієнт та показник степені.

### Висновки і перспективи подальших досліджень

1. Розроблена методика визначення швидкості росту тріщини в умовах втоми-повзучості.
2. Обґрунтовано доцільність використання для опису швидкості росту тріщини при циклічному навантаженні в умовах високих температур розмаху  $J$ -інтегралу, що дозволяє визначати вплив втомної складової  $\Delta J_f$  та складової  $\Delta J_c$ , обумовленої повзучістю  $\Delta J$ -інтегралу на швидкість росту тріщини, та підвищує достовірність отримуваних експериментальних даних.

*The methodology of definition of crack growth rate of creep-fatigue for bimetal single edge notched specimens was proposed in article . Use methodology of a allows correctly to take into account influence of creep and fatigue at elevated temperatures of tests.*

### Література

1. Y.Nakayama, N.Miura, Y.Takahashi, S.Date, T.Shimakawa, Y.Toya 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.
2. B.Gross Mode analysis of a face cracked plate subjected to rotationally constrained end displacements // International Journal of Fracture. - 1978 - Vol. 16, № 6. - P. 623-632
3. H.Kino, T.Igari, T.Tokiyoshi, F.Kawashima, M.Fujita, T.Teramae, S.Yoshino Creep-fatigue crack growth behavior of low alloy steel under displacement-controlled conditions The 7<sup>th</sup> International Conference on Creep and Fatigue at Elevated Temperatures on June 3-8, 2001.
4. K.Nikbin A unified European approach to high temperature defect assessment code and its incorporation in a knowledge base system // International Journal of Pressure Vessels and Piping - 2001 – Vol. 78, -P. 929-935.
5. N.Merah, T. Bui-Quoc, M. Bernard Creep-fatigue crack growth in notched SS-304 plates at 600 °C // Eng. Fract. Mech. - 1999 - Vol. 63 - P. 39-55.
6. J.Granacher, A.Klenk, M.Tramer, G.Schellenberg, F.Mueller, J.Ewald Creep fatigue crack behavior of two power plant steels // International Journal of Pressure Vessels and Piping - 2001 - Vol. 78 - P. 909-920.
7. Марущак П.О. Методика дослідження швидкості росту тріщин в умовах втоми-повзучості // Тези доповідей VI наукової конференції Тернопільського державного технічного університету 24-26 квітня 2002 року. Тернопіль: ТДТУ, С. 90-91.
8. ГОСТ 25.506-85 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний материалов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 62 с.

Одержано 27.03.2003 р.