

УДК 620.192.7

П.Ясній, докт.техн.наук; В.Гуцайлюк

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

## ПРОГНОЗУВАННЯ ВПЛИВУ ПОПЕРЕДНЬОГО ЦИКЛІЧНОГО ПРУЖНОПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ НА ОПІР КРИХКОМУ РУЙНУВАННЮ СТАЛІ 15Х2МФА

Подано методика оцінки впливу попереднього циклічного пружнопластичного деформування на опір крихкому руйнуванню сталі 15Х2МФА із різним рівнем окрихчення, що базується на використанні локального критерію руйнування-залежності напруження сколювання від попереднього циклічного напруження.

### Умовні позначення

$K_{IC}$	- в'язкість руйнування при статичному навантаженні;
$K_{fc}$	- циклічна в'язкість руйнування;
$N_T$	- кількість циклів до зародження тріщини;
$\overline{N}$	- відносна довговічність;
$N$	- кількість циклів навантаження;
$R$	- коефіцієнт асиметрії циклу;
$\sigma_{ск}$	- напруження сколювання;
$W$	- питома енергія непружної деформації ;
$k_w$	- коефіцієнт окрихчування матеріалу;
$\sigma_{0,2}$	- поріг текучості;
$\sigma^{u}_{ск}, \sigma^{u}_{0,2}$	- напруження сколювання та поріг текучості при циклічному навантаженні;
$\chi$	- параметр Одквіста.

Відомо, що параметри попереднього циклічного пружнопластичного деформування істотно впливають на в'язкість руйнування сталей при статичному  $K_{IC}$  і циклічному  $K_{fc}$  навантажуванні. Залежно від значення цих параметрів в'язкість руйнування  $K_{IC}$ ,  $K_{fc}$  може бути більшою або меншою порівнянно з в'язкістю руйнування первісного матеріалу [1-5].

При рівних значеннях амплітуди попереднього циклічного напруження в'язкість руйнування  $K_{IC}$  залежить також і від напрямку деформування в останньому півциклі [6]. Мінімальні значення  $K_{IC}$  отримані після останнього півциклу стиском, пов'язують із утворенням залишкових напружень розтягу.

Таким чином при оцінці утримувальної здатності елементів конструкцій, що піддаються попередньому циклічному пружнопластичному деформуванню, необхідно враховувати вплив попереднього циклічного пружнопластичного деформування на опір матеріалу крихкому руйнуванню. Підходи до прогнозування впливу попереднього циклічного пружнопластичного деформування на опір крихкому руйнуванню сталей ґрунтуються на використанні локальних критеріїв руйнування [7].

Запропонований авторами підхід [8] базується на моделі Хана [8] і враховує залежність границі текучості від параметрів навантажування, а саме амплітуди і кількості циклів навантаження.

Опір крихкому руйнуванню згідно з цієї моделі визначається таким чином:

$$\tilde{K}_{IC} = K_{IC} + \left( \frac{\sigma_{ск}}{7,431} \right)^3 \left[ \left( \frac{1}{\sigma^{u}_{0,2}} \right)^2 - \left( \frac{1}{\sigma_{0,2}} \right)^2 \right] - k_w W, \quad (1)$$

де  $K_{IC}$ — в'язкість руйнування недеформованого матеріалу;  $\sigma_{ск}$ — напруження сколювання;  $\sigma_{0,2}$ — поріг текучості;  $\sigma^{u}_{0,2}$ — циклічний поріг текучості;  $k_w$ — коефіцієнт окрихчування матеріалу;  $W$ — питома енергія непружної деформації.

Хоч запропонована методика і задовільно узгоджує експериментальні та розрахункові дані однак використання даної методики вимагає проведення прямих експериментів для обчислення коефіцієнта окрихчування  $k_w$ . Крім цього, не враховується залежність напруження сколювання  $\sigma_{ск}$  від параметрів циклічного навантаження, хоч відомо, що в залежно від матеріалу і умов навантаження  $\sigma_{ск}$  може збільшуватися або зменшуватися порівняно з недеформованим матеріалом [9-11].

У даній праці подано вдосконалену методику оцінки впливу попереднього циклічного пружнопластичного деформування на опір крихкому руйнуванню сталі **15X2MΦA** з різним рівнем окрихчення, що ґрунтується на експериментально виявленій залежності напруження сколювання від параметра Одквіста.

Досліджували сталь **15X2MΦA** у пластичному стані (**I**) і після термічної обробки (**II**), що моделювала радіаційне окрихчення матеріалу під дією нейтронного опромінення на кінець терміну експлуатації корпусу атомного реактора типу **ВВЕР - 440**.

Хімічний склад та характеристики механічних властивостей матеріалів при кімнатній температурі подані у таблиці.

Хімічний склад і характеристики механічних властивостей матеріалів

Матеріал	Хімічний склад %	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B$	$\delta$	$\psi$
		МПа		%	
<b>15X2MΦA(I)</b> [8]	0,18C; 0,62Mo; 0,27Si; 0,29V;	584	700	21,0	74,6
<b>15X2MΦA(II)</b> [8]	0,48Mn; 2,58Cr; 0,019S; 0,16N;	1100	1160	16,6	67,2
<b>15X2MΦA(III)</b> [9]	0,013P; 0,011Ti	560	665	7,4	74,1

Сталь **15X2MΦA(II)** випробовували на електрогідравлічній випробувальній машині **СТМ-100**, яка керується **ПК** типу **IBM AT 286**. З гладких пластин перерізом робочої частини **12,5×45 мм**, що піддавалися попередньому навантаженню (**R=-1**) на установці **Гідропульс 400 кН**, виготовлялися компактні зразки, які випробовували на в'язкість руйнування. Формули для визначення коефіцієнта інтенсивності напружень та розміри зразків подані у [8]. Розмах пружнопластичної деформації становив **0,6%**; **0,9%** та **1,4%** при відносному напрацюванні  $\bar{N} = 0,3; 0,6; 0,85; \bar{N} = N / N_T$ , де  $N_T$ — кількість циклів навантаження до появи на поверхні тріщини довжиною **0,5...2 мм**.

Попереднє циклічне пружнопластичне деформування та руйнування сталі **15X2MΦA(II)** виконували при температурі **293К**. В усіх випадках визначення в'язкості руйнування  $K_{IC}$  в'язкого підростання тріщини не спостерігалось.

Методика експериментальних досліджень та результати досліджень залежності опору крихкому руйнуванню від відносного напрацювання для компактних зразків товщиною  $t=12,5$  мм і  $t=14$  мм для сталі **15X2MΦA(I)** та **15X2MΦA(II)** відповідно подані у [8].

Для оцінки впливу попереднього циклічного пружнопластичного деформування на опір крихкому руйнуванню використаємо формулу (2), записавши величини  $\sigma_{ск}$  і  $\sigma_{0,2}$  як функції деяких параметрів циклічного навантаження

$$K_{IC} = \alpha \frac{\sigma_{ск}^3(\chi)}{\sigma_{0,2}^2(\Delta\epsilon)} \quad (2)$$

де  $\sigma_{ск}(\chi)$ — залежність напруження сколювання від параметру Одквіста;  $\sigma_{0,2}(\Delta\varepsilon)$ — залежність порога текучості від розмаху пружнопластичної деформації;  $\alpha$ —емпіричний коефіцієнт. Коефіцієнт  $\alpha$  визначався наступним чином: підставляючи у залежність (2) експериментально отримані значення  $\sigma_{ск}$ ,  $\sigma_{0,2}$  та  $K_{IC}$  для різних значень розмаху  $\Delta\varepsilon$  отримували систему рівнянь. Далі за допомогою прикладної програми "Mathcad" шукали наближений розв'язок цієї системи, приймаючи за невідоме коефіцієнт  $\alpha$ .

У результаті обчислень отримали значення  $\alpha=2,752$ .

Графіки залежностей  $\sigma_{0,2}—\Delta\varepsilon$  та  $\sigma_{ск}—\chi$  для сталі 15X2MΦA(I) і 15X2MΦA(II) подані на рис.1.

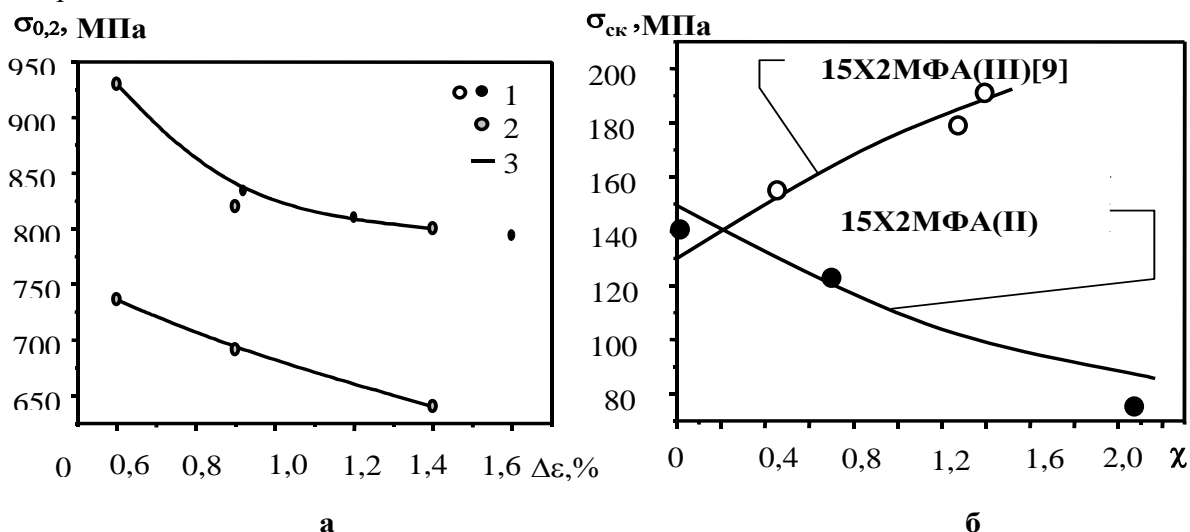


Рис. 1. Експериментальна залежність напруження  $\sigma_{0,2}$  від розмаху амплітуди пружнопластичної деформації  $\Delta\varepsilon$  (а) [8] та напруження сколювання  $\sigma_{ск}$  від параметру Одквіста  $\chi$  (б) для сталі 15X2MΦA.

1— $\varnothing=5\text{мм}$ ; 2— $\varnothing=10\text{мм}$ ; 3— апроксимуюча крива;  
для сталі 15X2MΦA(II) (темні значки)  $T=293\text{К}$ , сталь 15X2MΦA (I) (світлі значки)  $T=123\text{К}$ .

Із зростанням розмаху пружнопластичної деформації величина порога текучості  $\sigma_{0,2}$  сталі 15X2MΦA(I), 15X2MΦA(II) зменшується. У зв'язку з відсутністю даних про напруження сколювання (рис.1,а) для сталі 15X2MΦA(I) за основу для подальших обчислень взято залежність  $\sigma_{ск}$  від  $\chi$  сталі 15X2MΦA(III), що близька за механічними властивостями до сталі 15X2MΦA(I) [9] (див.табл.).

Із зростанням параметру Одквіста напруження сколювання  $\sigma_{ск}$  для сталі 15X2MΦA(III) зростає, а для сталі 15X2MΦA(II) зменшується. Такий характер зміни даної залежності повинен приводити до того, що залежність опору крихкому руйнуванню від  $\chi$  для цих сталей буде протилежний.

Апроксимація експериментальних значень за методом найменших квадратів дає наступні рівняння регресії для напруження сколювання [10]:

$$\sigma(\chi) = M + J e^{P\chi}, \quad (3)$$

де  $M=395,2 \text{ МПа}$ ;  $J=1900 \text{ МПа}$ ;  $P=-0,208$ — сталі 15X2MΦA(II).

Для сталі 15X2MΦA(III) напруження сколювання визначаємо за наступною формулою[11]:

$$\sigma_{ск} = [C_1 + C_2 e^{-A\alpha\chi}]^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

де  $C_1=2,50 \cdot 10^{-7} \text{ МПа}^{-2}$ ;  $C_2=4,21 \cdot 10^{-7} \text{ МПа}^{-2}$ ;  $A_g=1,71$ . Для обчислення напруження сколювання  $\sigma_{ск}$  для сталі **15Х2МФА(І)** використаємо значення коефіцієнтів, отримані для сталі **15Х2МФА(ІІІ)** [9].

Апроксимаційні залежності напруження сколювання від параметра Одквіста для обох сталей, (рис.1,б), (3) і (4) задовільно описують експериментальні дані.

На основі попередніх досліджень встановлено, що для сталі **15Х2МФА (ІІ)** крихке руйнування відбувається шляхом реалізації змішаного механізму руйнування із зменшенням частки внутрізернистого та зростанням частки міжзернистого руйнування, що приводить до зменшення  $\sigma_{ск}$  та опору крихкому руйнуванню  $K_{IC}$  [10].

Оскільки сталь **15Х2МФА (ІІІ)** близька за механічними властивостями до сталі **15Х2МФА(І)** та режимами циклічного пружнопластичного деформування, що передували визначенню напруження сколювання, можна очікувати, що залежності  $\sigma_{ск}$  від  $\chi$  і мікромеханізми руйнування вказаних сталей будуть приблизно однаковими. Отже, за аналогією, можна припустити, що крихке руйнування сталі **15Х2МФА(І)** у первісному і деформованому стані відбувається за домінуванням частки внутрішньозернистого руйнування (мікросколу та сколу), що приводить до зменшення  $\sigma_{ск}$  та опору крихкому руйнуванню  $K_{IC}$ .

Для перевірки достовірності та адекватності запропонованої залежності (2) були виконані експериментальні дослідження та використані результати, отримані авторами цієї статті раніше (рис.2).

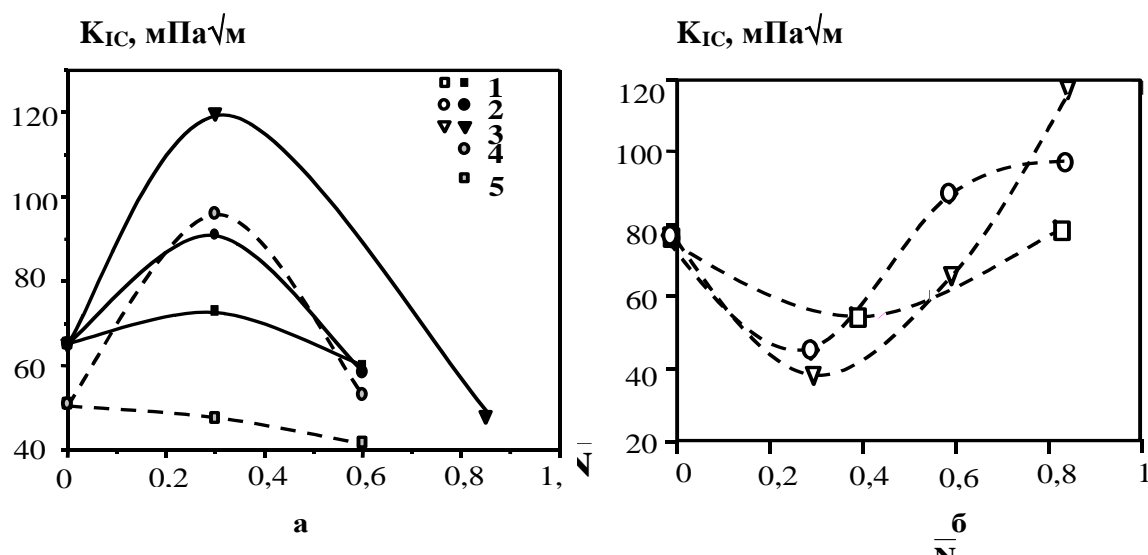


Рис.2. Експериментальна залежність в'язкості руйнування  $K_{IC}$  від  $\bar{N}$ :

а) сталь **15Х2МФА(ІІ)** (темні значки)

1— $\Delta\varepsilon=0,6\%$ ; 2— $\Delta\varepsilon=0,9\%$ ; 3— $\Delta\varepsilon=1,4\%$ ; для  $t=14 \text{ мм}$  [8]; 4— $\Delta\varepsilon=0,9\%$ ; 5— $\Delta\varepsilon=0,6\%$ ; для  $t=12,5 \text{ мм}$ ;

б) сталь **15Х2МФА(І)** (світлі значки) для  $t=12,5 \text{ мм}$  [8].

Для сталі **15Х2МФА(ІІ)** спостерігається певне зростання опору крихкому руйнуванню до напрацювання  $\bar{N}=0,3$  та його наступне зменшення. Характер поведінки залежності опору крихкому руйнуванню від відносного напрацювання не змінюється при зміні товщини зразків від **12,5 мм** до **14мм**.

Необхідно відзначити, що умова максимальної стисненості пластичної деформації для сталі **15Х2МФА(І)** при  $T=123\text{К}$  виконується лише до  $K_{IC}= 52,92 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  для  $t=12,5 \text{ мм}$ , а для сталі **15Х2МФА(ІІ)** при  $T=293\text{К}$  до  $K_{IC}= 78,5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  для  $t=14 \text{ мм}$  та  $K_{IC}= 74,16 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  для  $t=12,5 \text{ мм}$

На відміну від сталі **15Х2МФА(ІІ)** для **15Х2МФА(І)** спостерігається протилежний характер залежності  $K_{IC}$  від відносного напрацювання. Величина опору крихкому

руйнуванню зменшується до напрацювання  $\bar{N}=0,3$ , а у надалі зростає, прямуючи до деякої ділянки відносної стабілізації  $\Delta\varepsilon=0,9\%$  (рис. 2, б).

За формулою (2) побудовані залежності опору крихкому руйнуванню  $K_{IC}$  для сталі **15X2MΦA(II)** (рис.3) від розмаху повної деформації  $\Delta\varepsilon$  та від відносного напрацювання  $\bar{N}$ . Вказані графіки якісно подібні до експериментальних залежностей поданих на рис. 2.

Як видно з графіків на рис.3а, при різних значеннях величини відносного напрацювання  $\bar{N}$  та зростанні величини розмаху повної деформації від 0,8% до 1,2% опір крихкому руйнуванню сталі **15X2MΦA(II)** зростає, а на ділянці від 1,2% до 2% опір крихкому руйнуванню сталі **15X2MΦA(II)** зменшується.

Зростання розмаху повної деформації від 0,8% до 2% приводить до того, що опір крихкому руйнуванню  $K_{IC}$  зменшується впродовж усього діапазону напрацювання (рис.3,б). Очевидно, це можна пояснити тим, що при зростанні величини розмаху повної деформації ефект Баушингера виявляється у значно меншій мірі, а на  $K_{IC}$  більш істотно впливає зміна напруження сколювання  $\sigma_{ск}$ .

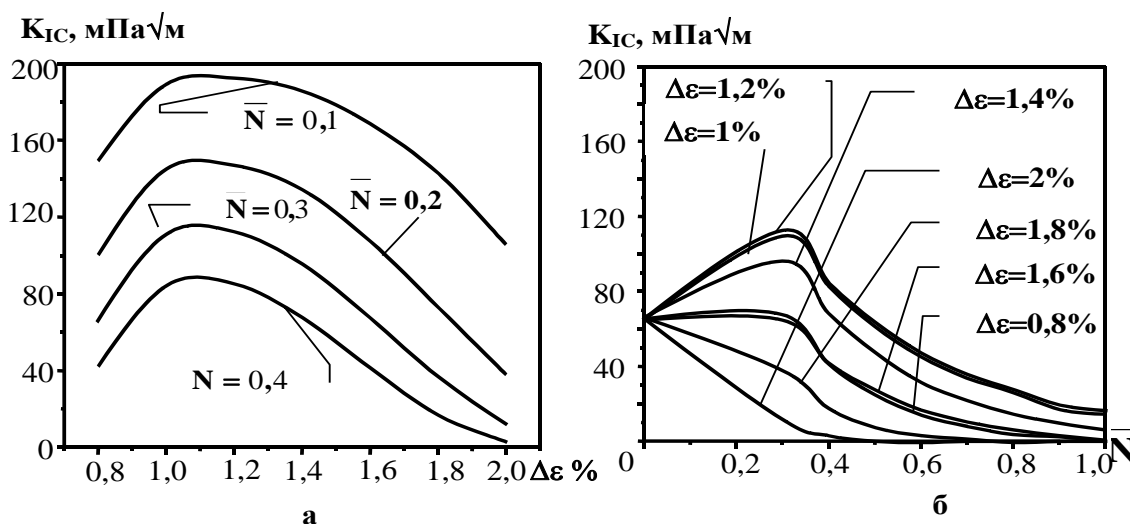


Рис.3. Розрахункова залежність в'язкості руйнування  $K_{IC}$  сталі **15X2MΦA(II)**  
 а) — від розмаху повної деформації  $\Delta\varepsilon$  %; б) — відносного напрацювання  $\bar{N}$ .

Усереднене значення  $K_{IC}$  для недеформованої сталі **15X2MΦA(II)** приведенне на рис.3,б, дорівнює  $65,3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Порівняння результатів експериментальних досліджень і розрахунку для сталей **15X2MΦA(II)** та **15X2MΦA(I)** подано на рис. 4.

Не залежно від товщини зразків для сталі **15X2MΦA(II)** отримано задовільне узгодження експериментальних і розрахункових для зразків різної товщини (рис. 4, а).

На рис.4,б подані експериментальні та розрахункові дані для сталі **15X2MΦA(I)**. Тут, на відміну від рис. 4,а, отримане задовільне узгодження розрахунку і експерименту лише для розмаху повної деформації  $\Delta\varepsilon=1,4\%$ . Похибка результатів експерименту і розрахунку для розмахів  $\Delta\varepsilon=0,6\%$   $\Delta\varepsilon=0,9\%$ , очевидно, пояснюється тим, що для розрахунку опору крихкому руйнуванню використовувалася залежність напруження сколювання  $\sigma_{ск}$  (4), отримана для сталі **15X2MΦA(III)** із близькими механічними властивостями.

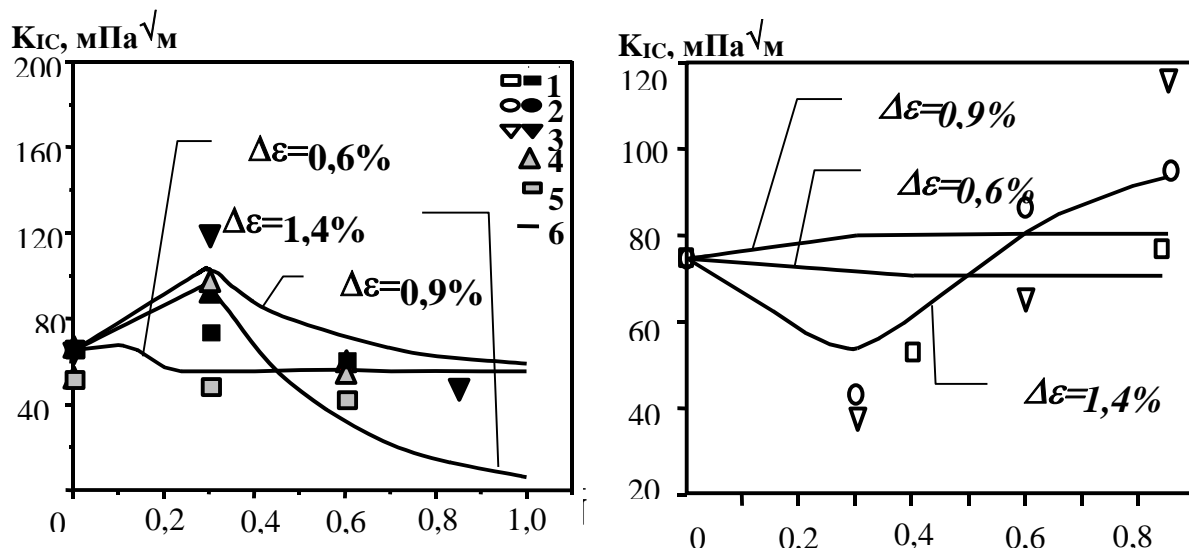


Рис.4. Залежність в'язкості руйнування  $K_{1c}$  від відносного напрацювання  $\bar{N}$  для сталі  $15X2M\Phi A$  :  
 а) (II)— (темні значки) 1— $\Delta\varepsilon=0,6\%$ ; 2— $\Delta\varepsilon=0,9\%$ ; 3— $\Delta\varepsilon=1,4\%$ ; експериментальні дані для  $t=14$  мм [8];  
 4— $\Delta\varepsilon=0,9\%$ ; 5— $\Delta\varepsilon=0,6\%$ ; експериментальні дані для  $t=12,5$  мм; 6—розрахунок за рівнянням (4);  
 б) (I)— (світлі значки, експериментальні дані) для  $t=12,5$  мм [8].

### ВИСНОВКИ

1. Запропонована методика прогнозування впливу попереднього циклічного пружнопластичного деформування на опір крихкому руйнуванню, що ґрунтується на аналізі закономірностей циклічного деформування з урахуванням залежності  $\sigma_{ск}$  від параметрів попереднього навантаження.
2. Запропонована методика використана для обчислення залежності в'язкості руйнування сталі  $15X2M\Phi A$  у пластичному (I) і окрихченому (II) стані від параметрів попереднього циклічного пружнопластичного деформування і задовільно узгоджується з експериментальними даними.

*The represented advanced procedure of an valuation of influence of prestress cyclic elasto-plastic deformation on resistance to brittle fracture of steel 15Cr2MoV with a different degree embrittlement, which is founded on use of local criteria of fracture - dependence cleavage stress from a preceding cyclic operating time.*

### Література

1. В.Т. Трощенко, А.Я. Красовский, Д.П. Синявский и др. Влияние истории деформирования и асимметрии цикла нагружения на характеристики циклической вязкости разрушения сплава ВТ9// Пробл. прочности.-1982.-№12.-С.3-6.
2. В.Т. Трощенко, А.Я. Красовский, Д.П. Синявский и др. Влияние истории деформирования на характеристики циклической вязкости разрушения сплава ВТ9 // Пробл. прочности.-1982.-№4.-С. 28 -32.
3. Иванова В.С., Кудряшов В.Г. Определение вязкости разрушения  $K_{1c}$  по результатам испытаний на усталость//Пробл. прочности.-.1970.-№3.-С.17-19.
4. Иванова В.С., Шанявский А.А. Количественная оценка длительности стабильного роста магистральной усталостной трещины методами фрактографии// Циклическая вязкость разрушения металлов и сплавов.-М.: Наука, 1981, С.168-193.
5. Романив О.Н., Ткач А.Н., Ленец Ю.Н. О возможном нарушении инвариантности кинетических диаграмм усталостного разрушения, вызываемом явлением закрытия трещины//Физ.-хим. механика материалов.-1984.-№6.-С.62-70.
6. Махутов Н.А. Деформационные критерии малоциклового и хрупкого разрушения //Автореферат дис. д-ра техн. наук М,1973.-71с.
7. Hahn G.T., Hoagland R.G., Rosenfield A.R. The variation of  $K_{1c}$  with temperature and loading rate//Met. Trans.-1971.-2, No2.-P.537-541.
8. Ясній П.В. Пластично деформовані матеріали:втома і тріщиноотривкість//Львів:Світ, 1998 - 292с.

## **МЕХАНІКА ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО**

9. **Карзов Г.П., Марголин Б.З., Швецова В.А.** Физико - механическое моделирование процессов разрушения. - СПб.: Политехника, 1993.- 391с.
10. **Ясній П.В., Гуцайлюк В.Б.** Вплив циклічного пружнопластичного деформування на механізм руйнування і напруження сколювання теплостійкої сталі. // Вісник ЖТІ.(в редакції).
11. **Марголин Б.З., Швецова В.А., Варовин А.Я.** Предварительное сжатие материала как фактор смены механизма хрупкого разрушения ОЦК-металлов. // Проблемы прочности 1996 №4, с.5-18.

*Одержано 26.02.2001 р.*