

## Вплив явища закриття вістря втомної тріщини на асиметрію циклу навантаження та пороги тріщиностійкості

І. С. Піняк

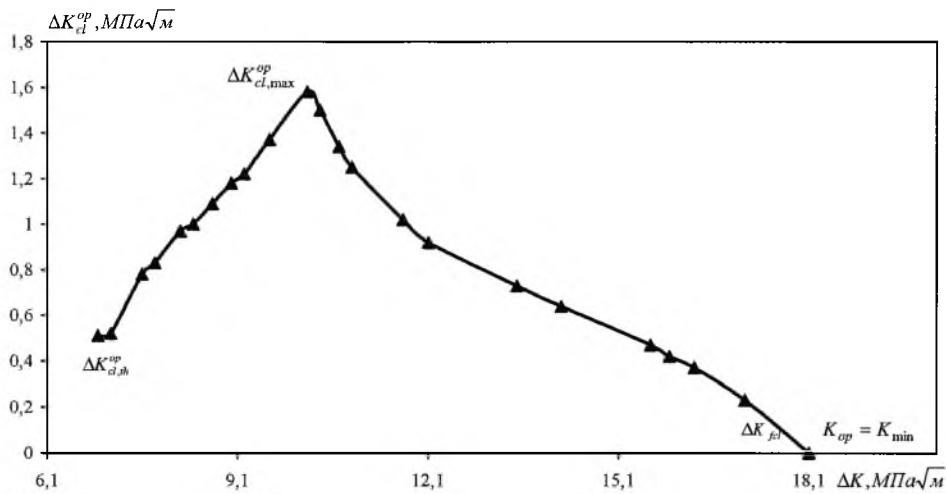
Інститут проблем міцності НАН України, Київ, Україна

На основі експериментальних даних показано, що в межах присутності закриття вістря втомної тріщини уявний вплив додатньої асиметрії  $R$  циклу навантаження на кінетику її росту та рівень порогів тріщиностійкості, які виражено через пороговий розмах коефіцієнта інтенсивності напружень  $\Delta K_{th,R}$ , – це лише кількісне відображення зміни характеристики закриття тріщини  $\Delta K_{cl}^{op}$  за умови користування номінальним розмахом коефіцієнта інтенсивності напружень  $\Delta K$ .

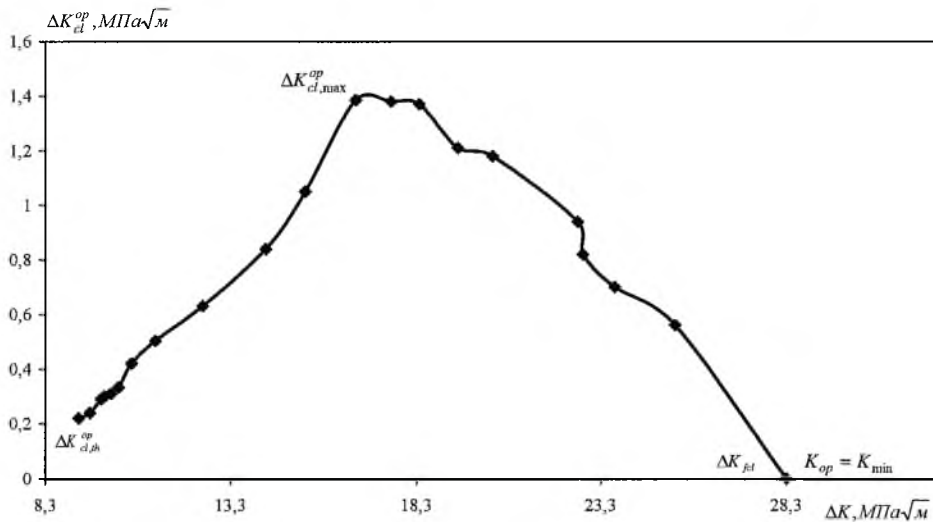
### Позначення

- $R, R^*$  – коефіцієнти асиметрії циклу навантаження відповідно за наявності та відсутності закриття тріщини (ЗТ)
- $K_{min}, K_{max}$  – мінімальний і максимальний коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН) в циклі
- $K_{op}$  – КІН розкриття тріщини в циклі
- $\Delta K$  – розмах КІН в циклі,  $\Delta K = K_{max} - K_{min}$
- $\Delta K_{eff}$  – ефективний розмах КІН в циклі
- $\Delta K_{th}, \Delta K_{th,R}$  – пороговий розмах КІН в циклі відповідно за однієї та різних асиметрій
- $\Delta K_{th,eff}, \Delta K_{th,eff,R}$  – ефективний поріг тріщиностійкості, або пороговий розмах КІН в циклі за асиметрії  $R$ , коли ЗТ присутнє, та його значення за асиметрії  $R$ , коли ЗТ сповільнено або різко зникає на ефективному порозі тріщиностійкості
- $\Delta K_{fcl,th}$  – критичний ефективний пороговий розмах КІН, для якого  $\Delta K_{th,eff,R} = \Delta K_{th,R}^*$ , і тріщина в циклі вже не закривається
- $\Delta K_{fcl}$  – критичний ефективний розмах КІН, для якого  $\Delta K_{eff} = \Delta K$ , і тріщина в циклі вже не закривається
- $\Delta K_{cl}^{op}$  – розмах КІН ЗТ в циклі (характеристика закриття тріщини)
- $\Delta K_{cl,max}^{op}$  – максимальне значення розмаху КІН ЗТ в циклі за конкретних умов навантаження
- $\Delta K_{cl,th}^{op}$  – пороговий розмах КІН ЗТ в циклі

**Вступ.** Одним з основних параметрів, що характеризують умови роботи конструкційних матеріалів, є коефіцієнт асиметрії  $R$  циклу навантаження. У літературних джерелах достатньо висвітлено вплив асиметрії  $R$  циклу на кінетику росту втомної тріщини та пороги тріщиностійкості  $\Delta K_{th,R}$  [1–11]. Відомі дані вказують на те, що вплив величини  $R = K_{\min} / K_{\max}$  на швидкість росту втомної тріщини помітний, хоча ступінь впливу може бути неоднозначним для різних матеріалів на різних стадіях розвитку втомної тріщини за умови відображення результатів експерименту в координатах  $\lg da / dN - \lg \Delta K$ . По мірі зростання  $R$  значно зменшується величина  $\Delta K_{th,R}$ , а на другій ділянці кінетичної діаграми втомного руйнування (КДВР) існує тенденція до слабого впливу параметра  $R$  на кінетику росту втомної тріщини [1, 3, 6–9].



а



б

Рис. 1. Залежність характеристики закриття тріщини  $\Delta K_{cl}^{op}$  від розмаху КН  $\Delta K$  для сталей 30L-1 (а) і D9H (б) при  $R=0,6$  і  $f=15$  Гц в умовах кімнатної температури.

Аналіз результатів дослідження швидкості росту втомної тріщини в координатах  $\lg da / dN - \lg \Delta K_{eff}$  показує [4, 5, 11, 12], що зі зростанням коефіцієнта асиметрії  $R$  циклу навантаження в межах  $0 \leq R \leq 0,7$  ефективний пороговий розмах КІН  $\Delta K_{th,eff}$  не змінюється, а КДВР залишаються інваріантними відносно величини  $R$  у визначеному діапазоні його зміни.

Результати робіт [13, 14] та рис. 1, 2 свідчать, що для сталей 30L-1 і D9H зі збільшенням асиметрії циклу навантаження в діапазоні  $0,1 \leq R < 0,7$  та  $0,1 \leq R \leq 0,65$  відповідно втомна тріщина буде залишатися закритою в кожному циклі навантаження до величини КІН  $K_{op}$  у межах визначених характеристик циклічної тріщиностійкості: від ефективного порогового  $\Delta K_{th,eff}$  до критичного ефективного розмаху КІН  $\Delta K_{fcl}$ . Умовою присутності ЗТ в залежності від асиметрії  $R$  циклу навантаження, як показано в роботі [13], є нерівність

$$(\Delta K_{th,eff} \leq \Delta K_{th})_{R,T,etc} \leq \Delta K_{eff} \leq \Delta K_{fcl,R,T,etc}. \quad (1)$$

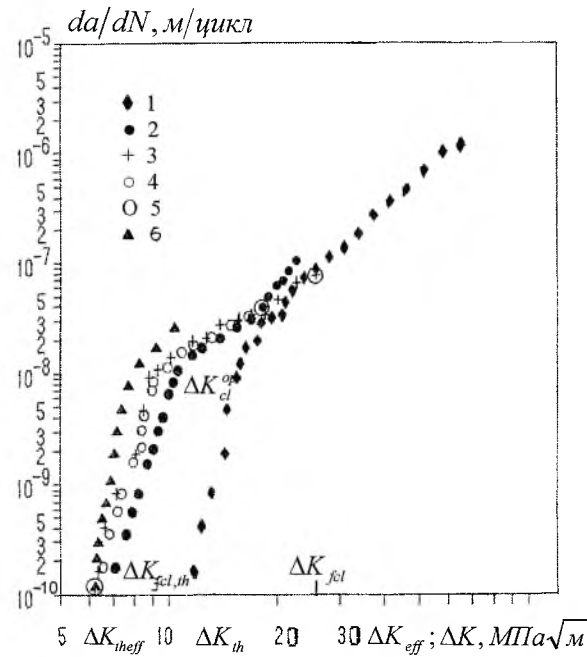
Для сталей 30L-1 і D9H при асиметрії  $R^* = 0,7$  і  $0,75$  відповідно закриття тріщини в циклі зникає за критичного ефективного порогового розмаху КІН  $\Delta K_{fcl,th}$  ( $\Delta K_{th,eff,R} = \Delta K_{th,R^*} = \Delta K_{fcl,th}$ , рис. 2). Однак для сталі D9H при  $R = 0,65$  пороговий розмах КІН  $\Delta K_{th,R=0,65}$  дорівнює ефективному пороговому розмаху  $\Delta K_{th,eff,R=0,1,\dots,0,6}$ , визначеному при  $0,1 \leq R \leq 0,6$  (рис. 2,б), але не дорівнює своєму власному ефективному значенню  $\Delta K_{th,eff,R=0,65}$ , тобто  $\Delta K_{th,eff,R=0,65} < \Delta K_{th,R=0,65} = \Delta K_{th,eff,R=0,1,\dots,0,6}$ . Для останнього має місце ефект закриття вістря тріщини, який в незначній мірі впливає на припорогову кінетику росту втомної тріщини. Максимальне значення характеристики ЗТ становить  $\Delta K_{cl,max}^{op} = 0,5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ . Присутність явища ЗТ свідчить, що механічне зменшення розмаху КІН  $\Delta K$ , зумовлене ростом асиметрії  $R$  циклу навантаження, не встигає зменшити до нуля характеристику ЗТ  $\Delta K_{cl}^{op}$ .

Таким чином, ЗТ має місце в інтервалі від значення критичного ефективного порогового розмаху КІН  $\Delta K_{fcl,th}$  (характеристика  $\Delta K_{fcl,th}$  може бути меншою, ніж ефективний поріг тріщиностійкості  $\Delta K_{th,eff}$ ) до критичного ефективного розмаху КІН  $\Delta K_{fcl}$ . Тоді наведену вище нерівність запишемо у вигляді критерію присутності закриття тріщини:

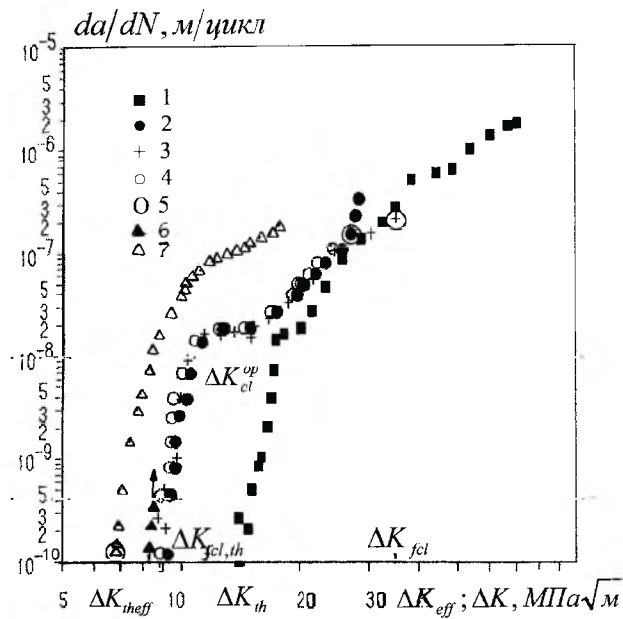
$$\Delta K_{fcl,th,R,T,etc} \leq \Delta K_{eff} \leq \Delta K_{fcl,R,T,etc}. \quad (2)$$

Аналіз експериментальних даних [13–14] підтверджує факт [4, 5, 11, 12], що КДВР, представлені в координатах  $\lg da / dN - \lg \Delta K_{eff}$ , інваріантні відносно величини  $R$ , але в межах наявності закриття тріщини. Границі інваріантності описуються нерівністю

$$(\Delta K_{th,eff} < \Delta K_{th})_R \leq \Delta K_{eff} \leq \Delta K_{fcl,R}. \quad (3)$$



a



б

Рис. 2. Залежність швидкості росту втолюної тріщини  $da/dN$  від  $\Delta K$  (1, 2, 6, 7),  $\Delta K_{eff}$  (3, 4) для сталей 30L-1 (а) і D9H (б) за різних асиметрій: 1, 3 –  $R=0,1$ ; 2, 4 –  $R=0,6$ ; 6 –  $R=0,7$  (0,65 для рис. б); 7 –  $R=0,75$  в умовах кімнатної температури; 5 – момент зникнення закриття тріщини.

За умови побудови КДВР в координатах  $\lg da/dN - \lg \Delta K$  отримуємо поза межами наявності закриття тріщини вплив додатньої асиметрії  $R$  циклу навантаження на кінетику її росту та пороги тріщиностійкості. У границях

присутності закриття тріщини цей уявний вплив не що інше як кількісне відображення зміни характеристики закриття тріщини  $\Delta K_{cl}^{op}$  за умови користування номінальним розмахом КІН  $\Delta K$ .

Висвітлена передумова ставить мету даної роботи – експериментальний аналіз впливу асиметрії циклу навантаження на кінетику росту втомної тріщини та рівень порогів тріщиностійкості в межах наявності закриття тріщини для двох конструкційних сталей.

**Матеріали і методика експерименту.** Дослідження проводили на компактних зразках для позacentрового розтягу товщиною 12,5 мм зі сталей 30L-1 та D9H зарубіжного виробництва. Хімічний склад та механічні властивості сталей наведено раніше [14].

Характеристики циклічної тріщиностійкості сталей вивчали при  $R = 0,1; 0,6; 0,65; 0,7; 0,75$  в умовах кімнатної температури ( $T = 293$  К) згідно з методичними вказівками [15]. Частота навантаження зразка становила 15 Гц.

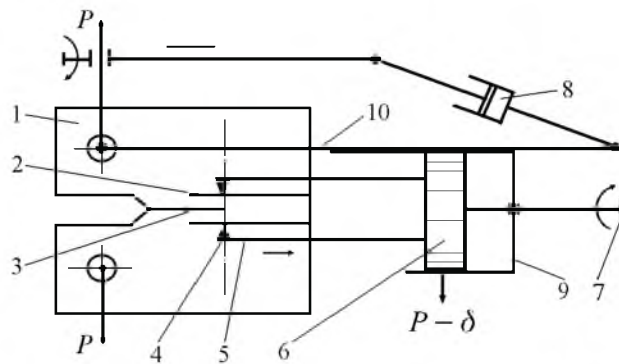


Рис. 3. Методика поточного розкриття вістря втомної тріщини.

Зусилля  $P_{op}$  поточного розкриття вістря втомної тріщини вимірювали датчиком розкриття вістря тріщини при частоті навантаження зразка 0,1 Гц за методикою, частково описаною в роботах [14, 16–18]. Суть методики полягає в тому, що згідно з роботою [18] на бокових поверхнях компактного зразка 1 нарізали дві пари конічних канавок 2 симетрично лінії передбачуваного росту втомної тріщини 3 (рис. 3). Голки 4 щупів 5 датчика 6 розміщували в канавках глибиною 0,2 мм на відстані одна від одної 3,6 мм, які виконано замість лунок [11, 12]. Голки виставляли на рівень рухомого вістря тріщини і переміщували їх за допомогою мікрометричного гвинта 7 по мірі росту втомної тріщини. Інерцію маси корпуса датчика гасили за допомогою телескопічного демпферного вузла 8. Корпус датчика розміщували на направляючій 9, котру кріпили до опори 10. Остання утримувалася на пальці, зразку та демпферному вузлі. За допомогою оптичного мікроскопа типу MBS-9, який використовується для визначення довжини тріщини і має можливість переміщуватися вздовж її лінії росту (на рис. 3 не показано), на одній лінії вістря тріщини зіставляли візирну мітку однієї голки щупа датчика та вимірювальну поділку окуляра мікроскопа (на рис. 3 штрихпунктирна лінія). При цьому отримували залежності  $P - \delta$ , за якими

визначали  $P_{op}$  [12, 16]. Отже, в комплексі вимірювали довжину та зусилля  $P_{op}$  розкриття вістря підростаючої втомної тріщини. Розкриття вістря втомної тріщини вимірювали з точністю до 14 мкм позаду вістря підростаючої тріщини. Далі визначали  $K_{op}$  та  $\Delta K_{eff}$  згідно з роботами [12, 15].

**Результати експерименту та їх обговорення.** На рис. 1 представлено залежності розмаху КІН закриття тріщини  $\Delta K_{cl}^{op}$  від розмаху КІН  $\Delta K$  для сталей 30L-1 та D9H при  $R = 0,6$ . Величина  $\Delta K_{cl}^{op}$  визначається як різниця [13, 14]

$$\Delta K_{cl}^{op} = K_{op} - K_{min}. \quad (4)$$

Залежності  $\Delta K_{cl}^{op}$  від  $K_{max}$  при  $R = 0,6$  для сталі D9H та при  $R = 0,1$  для досліджуваних сталей приведено в роботах [13, 14]. Експериментально отримані залежності для вказаних сталей свідчать, що характеристика закриття тріщини  $\Delta K_{cl}^{op}$  (4) поступово зростає до максимального значення  $\Delta K_{cl,max}^{op}$ , а потім зменшується до мінімального КІН циклу  $K_{min}$  ( $\Delta K_{cl}^{op} \rightarrow 0$ ) при  $R = 0,1$  і  $0,6$ .

Рис. 2 ілюструє результати дослідження впливу асиметрії циклу навантаження  $R$  на кінетику росту втомної тріщини. Побудовані в координатах  $\lg da / dN - \lg \Delta K_{eff}$ ,  $\lg \Delta K$  КДВР наочно відображають при згаданих вище асиметриях циклу навантаження наступну залежність:

$$\Delta K = \Delta K_{eff} + \Delta K_{cl}^{op}. \quad (5)$$

Величина  $\Delta K_{eff}$  визначається як різниця [11]

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op}. \quad (6)$$

Аналіз даних (рис. 2), який наведено нижче, підтверджує, що розмах КІН  $\Delta K$  є складовою двох величин –  $\Delta K_{eff}$  і  $\Delta K_{cl}^{op}$ . Величина  $\Delta K_{cl}^{op}$  дорівнює нулю за критичного ефективного розмаху КІН  $\Delta K_{fcl}$ , що ілюструють рис. 1, 2 та дані робіт [13, 14]. При перевищенні величини  $\Delta K_{fcl}$  ефективний розмах КІН  $\Delta K_{eff}$  буде дорівнювати номінальному розмаху КІН  $\Delta K$ , оскільки ЗТ відсутнє.

Тепер проаналізуємо результати експерименту і покажемо, що кількісне урахування характеристики закриття тріщини  $\Delta K_{cl}^{op}$  за умови користування номінальним розмахом КІН  $\Delta K$  циклу в межах наявності ЗТ є не що інше як ознака уявного впливу додатньої асиметрії  $R$  циклу навантаження на кінетику росту втомної тріщини та рівень порогів тріщиностійкості  $\Delta K_{th,R}$ . Аналіз будемо проводити скорочений, лише для трьох характерних значень розмаху КІН закриття тріщини  $\Delta K_{cl}^{op}$ :  $\Delta K_{cl}^{op} = \Delta K_{cl,th}^{op}$ ;  $\Delta K_{cl}^{op} = \Delta K_{cl,max}^{op}$ ;  $\Delta K_{cl}^{op} = 0$  згідно з даними рис. 1, 2 та роботами [13, 14] для сталей 30L-1 і D9H.

Для сталі 30L-1 при асиметрії циклу  $R = 0,6$  в умовах кімнатної температури пороговий розмах КІН закриття тріщини  $\Delta K_{cl,th}^{op} = 0,5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  (рис. 1,*a*), поріг тріщиностійкості  $\Delta K_{th} = 6,9 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ , його ефективне значення  $\Delta K_{th,eff} = 6,4 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  (рис. 2,*a*). При  $\Delta K = 10,2 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  і  $\Delta K_{eff} = 8,6 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  (рис. 1,*a* і 2,*a*) значення характеристики закриття тріщини максимальне –  $\Delta K_{cl,max}^{op} = 1,6 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  (рис. 1,*a*). Закриття тріщини зникає за критичного ефективного розмаху КІН  $\Delta K_{fcl} = 18,1 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  (рис. 1,*a* і 2,*a*). Для асиметрії циклу  $R = 0,1$  порогова характеристика закриття тріщини  $\Delta K_{cl,th}^{op} = 5,3 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  [13], поріг тріщиностійкості  $\Delta K_{th} = 11,7 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ , його ефективне значення  $\Delta K_{th,eff} = 6,4 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  (рис. 2,*a*). При  $\Delta K = 15,5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  і  $\Delta K_{eff} = 8,8 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  значення характеристики закриття тріщини максимальне –  $\Delta K_{cl,max}^{op} = 6,7 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  [13]. При  $\Delta K_{fcl} = 25,7 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  закриття тріщини зникає (рис. 2,*a* і [13]). Як бачимо, залежність (5) для сталі 30L-1 підтверджується.

Для сталі D9H при асиметрії циклу  $R = 0,6$  в умовах кімнатної температури пороговий розмах КІН закриття тріщини  $\Delta K_{cl,th}^{op} = 0,2 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  (рис. 1,*b* і [14]), поріг тріщиностійкості  $\Delta K_{th} = 9,2 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ , його ефективне значення  $\Delta K_{th,eff} = 9,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  (рис. 2,*b*). При  $\Delta K = 16,7 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  і  $\Delta K_{eff} = 15,3 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  (рис. 2,*b*) значення характеристики ЗТ максимальне –  $\Delta K_{cl,max}^{op} = 1,4 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  (рис. 1,*b* і [14]). При  $\Delta K_{fcl} = 28,3 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  закриття тріщини зникає (рис. 1,*b* і 2,*b*). Для асиметрії циклу  $R = 0,1$  параметри, що розглядаються, становлять:  $\Delta K_{cl,th}^{op} = 5,2 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  [13, 14] при  $\Delta K_{th} = 14,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  і  $\Delta K_{th,eff} = 8,8 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  (рис. 2,*b*);  $\Delta K_{cl,max}^{op} = 6,9 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  [13, 14] при  $\Delta K = 17,2 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  і  $\Delta K_{eff} = 10,3 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  (рис. 2,*b*), а ЗТ зникає при  $\Delta K_{fcl} = 34,5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  (рис. 2,*b* і [13, 14]). Залежність (5) для сталі D9H також підтверджується.

Таким чином, інваріантність КДВР відносно асиметрії  $R$  циклу навантаження забезпечується проявом ефекту закриття вістря втомної тріщини, в межах його наявності, від ефективного порогового розмаху КІН  $\Delta K_{th,eff}$  (можливо, критичного ефективного порогового розмаху КІН  $\Delta K_{fcl,th}$ ) до критичного ефективного розмаху КІН  $\Delta K_{fcl}$ . Можна бачити, що експериментально отримані залежності  $\Delta K_{cl}^{op} - \Delta K$  (рис. 1 та [13, 14]) відображають і узагальнюють вплив механізмів закриття вістря втомної тріщини (шорсткість та окисли на поверхнях злому і розмір циклічної пластичної зони у вістрі втомної тріщини з пластичним потоком вздовж її берегів) на кінетику її росту в матеріалі (рис. 2). Аналіз залежностей також показує, що ЗТ, очевидно, виступає у ролі “буфера” (запасу) циклічної

тріщиностійкості матеріалу, котрий “вичерпується” асиметрією  $R$  циклу навантаження (при цьому ріст величини  $R$  механічно зменшує номінальний розмах КІН  $\Delta K$ ) в межах наявності ЗТ, і дозволяє процесу руйнування протікати однаково незалежно від параметра  $R$  у цих межах.

## Висновки

1. Із наведених експериментальних даних випливає, що при побудові КДВР в координатах  $\lg da / dN - \lg \Delta K$  враховується зміна характеристики закриття тріщини  $\Delta K_{cl,th}^{op} \rightarrow \Delta K_{cl,max}^{op} \rightarrow 0 (K_{min})$  за умови номінального розмаху КІН  $\Delta K$  в межах присутності ЗТ, що є причиною уявного впливу додатної асиметрії циклу навантаження  $R$  на пороги тріщиностійкості  $\Delta K_{th,R}$  та кінетику росту втомної тріщини в цих межах.

2. Щоб достовірно описати кінетику росту втомної тріщини і виключити помилкове урахування впливу на неї та на рівень порогів тріщиностійкості  $\Delta K_{th,R}$  додатної асиметрії  $R$  циклу навантаження в межах наявності закриття тріщини, необхідно за допомогою методики поточного розкриття вістря тріщини отримати експериментальні дані, а потім побудувати КДВР в координатах  $\lg da / dN - \lg \Delta K_{eff}, \lg \Delta K$ .

## Резюме

На основе экспериментальных данных показано, что в границах присутствия закрытия трещины кажущееся влияние положительной асимметрии  $R$  цикла нагружения на кинетику роста усталостной трещины и пороги трещиностойкости, которые выражены через пороговый размах коэффициента интенсивности напряжений  $\Delta K_{th,R}$ , – это лишь количественное отображение изменения характеристики закрытия трещины  $\Delta K_{cl}^{op}$  при использовании номинальным размахом КИН  $\Delta K$ .

1. *Механика разрушения и прочность материалов: Справочное пособие / Под ред. В. В. Панасюка. – Киев: Наук. думка, 1990. – Т. 4. – 679 с.*
2. *Vosikovski O. The effect of stress ratio on fatigue crack growth rates in steels // Eng. Fract. Mech. – 1979. – 11, N 3. – P. 595 – 602.*
3. *Каплун А. Б. Влияние параметров цикла нагружения на рост усталостных трещин (обзор) // Физ.-хим. механика материалов. – 1978. – № 4. – С. 58 – 68.*
4. *Троценко В. Т., Покровский В. В., Подкользин В. Ю., Ясний П. В. Влияние асимметрии циклов нагружения и прочностных характеристик на циклическую трещиностойкость конструкционных сплавов с учетом явления закрытия усталостной трещины // Пробл. прочности. – 1991. – № 10. – С. 17 – 25.*
5. *Марси Г., Хоцяновский А. О. Экспериментальные методы исследования роста усталостных трещин и концепция  $\Delta K_{eff}$  // Там же. – 1995. – № 7. – С. 13 – 30.*



6. Гнын И. П., Лычковский Э. И., Похмурский В. И. Прогнозирование влияния асимметрии циклов нагружения на скорость роста трещин // Физ.-хим. механика материалов. – 1991. – № 3. – С. 61 – 65.
7. Sasaki E., Ohta A., Kosuge M. Fatigue crack propagation rate and stress intensity threshold level of several structural materials at varying stress ratios ( $-1 \sim 0,8$ ) // Trans. Nat. Res. Inst. Metals. – 1977. – **19**, N 4. – P. 183 – 199.
8. Liaw P. K., Leax T. R., Longsdon W. A. Near-threshold fatigue crack growth behavior in metals // Acta met. – 1983. – **31**, N 10. – P. 1581 – 1587.
9. Klesnil M., Lucas P. Fatigue of Metallic Materials. – Prague: Academia, 1980. – 239 p.
10. Nakai Y., Tanaka K., Kawashima R. Stress-ratio effect on fatigue crack growth threshold in steels // J. Soc. Mater. Sci. Jap. – 1984. – **33**, N 371. – P. 1045 – 1051.
11. Elber W. The significance of fatigue crack closure // Damage tolerance in aircraft structures. – ASTM Spec. Techn. Publ. – 1971. – N 486. – P. 230 – 242.
12. Романив О. Н., Никифорчин Г. Н., Андрусив Б. Н. Эффект закрытия трещин и оценка циклической трещиностойкости конструкционных сплавов // Физ.-хим. механика материалов. – 1983. – № 3. – С. 47 – 61.
13. Пиняк И. С. Текущее значение раскрытия вершины трещины усталости как экспериментально обоснованный критерий ее роста // Пробл. прочности. – 1998. – № 1. – С. 25 – 33.
14. Пиняк И. С. Влияние закрытия трещины на определяемые характеристики циклической трещиностойкости сталей // Там же. – № 2. – С. 161 – 171.
15. Методы механических испытаний материалов. Определение характеристик трещиностойкости при циклическом нагружении. Методические указания. Сер. Проблемы прочности, долговечности и надежности продукции машиностроения. – М.: МНТК “Надежность машин”, 1993. – 56 с.
16. Красовский А. Я., Пиняк И. С. Описание кинетики роста трещины усталости на основе критерия текущего раскрытия ее вершины // Там же. – 1998. – № 4. – С. 60 – 68.
17. А. с. 17/4427 СССР МКИ<sup>4</sup> G01 N 3/32. Установка для определения характеристик трещиностойкости материалов / И. С. Пиняк, А. В. Наумов, В. М. Морозов. – Оpubл. 23. 02. 92, Бюл. № 7.
18. А. с. 1670357 СССР МКИ<sup>5</sup> G01 B 5/30. Способ измерения раскрытия трещины на образце / Ю. А. Кашталян, И. С. Пиняк. – Оpubл. 15. 08. 91, Бюл. № 30.

Поступила 25. 12. 98