УДК 539.4

Залежності між локальними характеристиками силового та деформаційного критеріїв при поширенні довгої наскрізної втомної тріщини

І. С. Піняк

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

На основі аналізу силових концепцій оцінки кінетики росту довгої втомної тріщини та механічної ситуації у її вістрі установлено достовірний зв'язок між локальними характеристиками силового та деформаційного критеріїв.

Ключові слова: довга наскрізна втомна тріщина, механічна ситуація у вістрі тріщини, локальні характеристики силового і деформаційного критеріїв.

Позначення

$K_{\mathrm{I}}, K_{\mathrm{II}}, K_{\mathrm{III}}$ – коефіцієнти інтенсивності напружень за I, II, III схемами деформування тіла з тріщиною

$\Delta K_{\mathrm{I}}, \Delta\delta_{\mathrm{I}}$ – номінальні розмахи коефіцієнта інтенсивності напружень і розкриття вістря тріщини, $\Delta K_{\mathrm{I}} = K_{\mathrm{I\,max}} - K_{\mathrm{I\,min}}$, де $K_{\mathrm{I\,min}}$, $K_{\mathrm{I\,max}}$ – найменше і найбільше значення коефіцієнта інтенсивності напружень

$\Delta K_{\mathrm{I}eff}, \Delta\delta_{\mathrm{I}eff}$ – ефективні розмахи коефіцієнта інтенсивності напружень і розкриття вістря тріщини, $\Delta K_{\mathrm{I}eff} = \Delta K_{\mathrm{I}} - \Delta K_{cl}^{op}$ [1]

ΔK_{cl}^{op} – характеристика закриття тріщини, $\Delta K_{cl}^{op} = K_{op} - K_{\mathrm{I\,min}}$ [1]

$\delta_{op,i}, P_{op,i}$ – поточне розкриття вістря тріщини і зусилля, що необхідне для його розкриття в циклі

$P_{\min}, P_{\max}, P_{cl}$ – відповідно зусилля мінімальне, максимальне та таке, що необхідне для закриття тріщини

$\Delta K_{eff,X}^{f,inv}, \Delta K_{fcl,X}$ – найбільші значення ефективного розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень, до яких руйнування матеріалу в часі за широкого діапазону окремої дії відповідно багатьох та одного (комплексного впливу багатьох) чинника X протікає адекватно і незмінно

$(da/dN)_X$ – швидкість поширення довгої наскрізної втомної тріщини в часі за широкого діапазону дії багатьох та одного чинника X

Постановка задачі. Руйнування матеріалу елементів механізмів, машин, конструкцій і споруд протікає на нано-, мікро- та макрорівнях. Розвиток нанотріщини супроводжується зростанням кількості розірваних міжатомних "зв'язків", що отримало назву "накопичення пошкоджень". Ріст тріщини на

© І. С. ПІНЯК, 2007

мікро- (довжина тріщини менша за розмір зерна полікристалічного матеріалу) та макрорівнях (поширення макротріщини, тобто короткої – внутрішньої, поверхневої та довгої – наскрізної, що призводить до зруйнування елемента) характеризується збільшенням кількості розірваних "елементарних комірок" кристалічних граток у вістрі по всьому фронту тріщини [2, 3].

Процес пружно-пластичного деформування (руйнування) тіла з тріщиною за I, II та III схемами протікає за "пом'якшених" умов праці конструкційного матеріалу елемента. Описати цей процес із невисокою достовірністю можна при використанні лінійно-пружної механіки руйнування (ЛПМР), яка постулює, що напружений стан тіла в околі вістря тріщини характеризується коефіцієнтами інтенсивності напружень (КІН) K_{I}, K_{II}, K_{III} [4, 5].

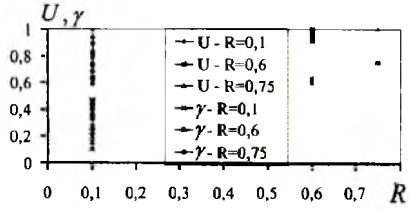
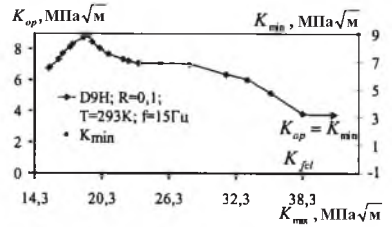
Такий підхід відіграв значну роль у розвитку силових концепцій оцінки кінетики росту макротріщини. У таблиці наведено основні рівняння для опису швидкості росту втомної тріщини, що отримані з використанням номінального ΔK_{I} або ефективного $\Delta K_{\mathrm{I}eff}$ розмахів КІН.

Головний недолік розглянутих концепцій – це необхідність інтерполяції результатів виміру розкриття тріщини у вістрі та виявлення верхньої межі наявності явища закриття тріщини (ЗТ), яке характеризується ефективним розмахом КІН $\Delta K_{fcl,X}$ [1]. Метод реєстрації поточного розкриття вістря тріщини [6] ураховує відмічені недоліки і дозволяє достовірно описати процес пружно-пластичного руйнування з позицій ЛПМР [4].

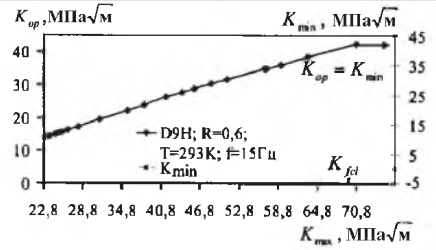
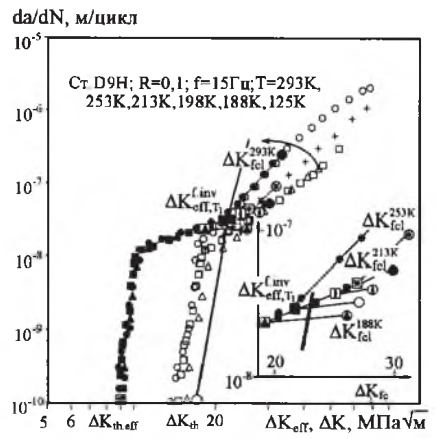
Мета роботи – на основі аналізу силових концепцій оцінки кінетики росту довгої втомної тріщини та механічної ситуації у її вістрі установити емпіричний зв'язок між локальними характеристиками силового та деформаційного критеріїв.

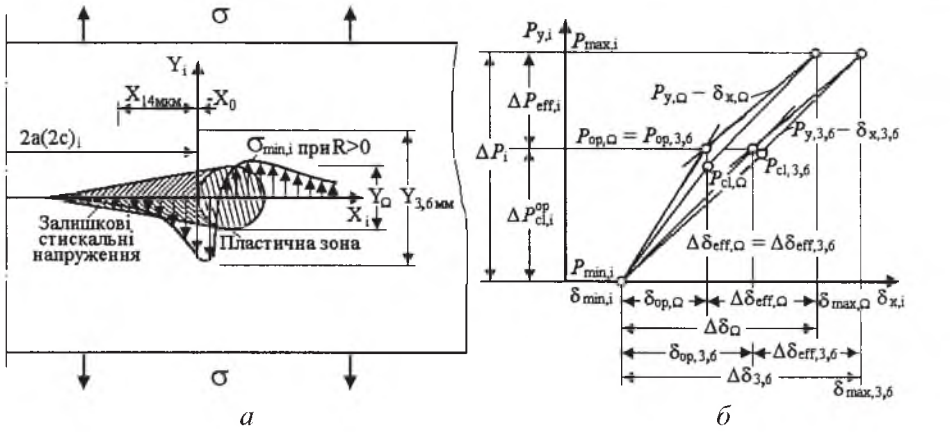
Механічна ситуація у вістрі довгої наскрізної тріщини. Метод реєстрації у ручному режимі розкриття вістря тріщини дозволяє отримувати поточні залежності зусилля – розкриття вістря тріщини $(P_{y,i} - \delta_{x,i})$, за допомогою яких визначаються достовірні значення поточного розкриття тріщини $\delta_{op,i}$ та зусилля $P_{op,i}$, що необхідне для її розкриття в циклі [6]. Потрібна достовірність результатів забезпечується завдяки тому, що зареєстровані поточні зусилля розкриття вістря тріщини $P_{op,i}$ та ефективний розмах розкриття її вістря $\Delta\delta_{eff,i}$ на базі вимірювання $\Omega \le y_i \le 3{,}6$ мм на відстані від кінчика тріщини $x_i \le 14$ мкм (в [7] отримано $x_i = 1{,}4$ мм) на поверхні зразка залишаються в циклі сталими величинами (рис. 1) [8]. Цей факт забезпечується залишковими стискальними напруженнями на берегах поблизу вістря тріщини [2, 3, 9, 10] та наявністю пластичної зони у її вістрі. Тут Ω – параметр, що характеризує контур пластичної зони у вістрі тріщини із залишковими стискальними напруженнями на берегах поблизу її вістря. Стискальні напруження стримують поширення тріщини в межах наявності її закриття, а пластична зона не дозволяє у вістрі тріщини атомам "елементарних комірок" кристалічних граток зайняти положення, що призведе до розриву їх зв'язків (поширення тріщини). У такий спосіб за умов навантаження в циклі стискальні напруження та пластична зона забезпечують стале значення зусилля розкриття тріщини $P_{op,i}$ та ефективного розмаху КІН $\Delta K_{eff,i}$, що обчислений з його урахуванням.

Деякі силові концепції оцінки кінетики росту довгої втомної тріщини

Концепція	Основні недоліки, які висвітлено в літературних джерелах	Отримана формула та досліджуваний матеріал	Літературне джерело
1	2	3	4
$da/dN = f(\Delta K)$	Застосовуються лише номінальні характеристики конструкційного матеріалу	$da/dN = C(\Delta K)^n$ $da/dN = C(\Delta K)^n/(1-R)K_c - \Delta K$ $da/dN = 10^{-7}(\Delta K/K^*)^n$	[5] [11] [12]
$da/dN = f(U, \Delta K_{eff})$ $U = \Delta K_{eff}/\Delta K$ $U = f(-0{,}1 \le R \le 0{,}7)$, де R – асиметрія циклу	Низька достовірність визначення коефіцієнтів U, γ із залежностей $U, \gamma - R$ [1] 	$da/dN = C[(0{,}5 + 0{,}4R)\Delta K]^n$, алюмінієвий сплав 2024-Т3	[13]
$da/dN = f(\gamma, K_{\max})$ $\gamma = K_{op}/K_{\max}$ $\gamma = f(R)$ $\gamma(U)$ – коефіцієнт		$da/dN = C[K_{op}/(0{,}45 + 0{,}2R) + 0{,}25R^2 + 0{,}1R^3]^n$, алюмінієвий сплав 2024-Т3	[14]
$da/dN = f(K_{\max} - K_{op})$ $K_{op} = f(R, K_{\max})$ $R > 0$	Величина K_{op} залежить від КІН $K_{\max}$ як за однієї, так і за різних асиметрій R [1] 	$da/dN = C[K_{\max} - (1{,}035K_{\max} - 1{,}252\ln K_{\max} - -0{,}09\exp(0{,}05K_{\max}))]^n$, алюмінієвий сплав 7075-7351	[15]

продовження таблиці

1	2	3	4
$da/dN = f(K_{\max} - K_{op})$ $K_{op} = f(K_{\max})$ $R > 0$		$da/dN = C[K_{\max} - (0{,}74K_{\max} - 1{,}12 - 0{,}012K_{\max}^2)]^n$, сталь 15Х2МФА(1)	[16]
$da/dN = f(\Delta K_{fcl,X}, \Delta K_X)$ $\Delta K_{fcl,X} = f(X)$ X – дія різних чинників (асиметрія, температура та ін.) за наявності явища закриття вістря тріщини	**Переваги концепції** Виявлено, що руйнування матеріалу в часі за дії одного та багатьох чинників X протікає адекватно і незмінно лише до ефективних розмахів КІН [9, 10] 	$(da/dN)_X = \begin{cases} \dfrac{C_1(\Delta K_{th,X}\Delta K_{fc,X})^{n_2/2}}{\Delta K_{fcl,X}^{n_2-n_1}} + \\ + \begin{cases} -(\sqrt{\Delta K_{th,X}\Delta K_{fc,X}} - \Delta K_X)^{q_{2,I}} \\ \text{при} \quad \Delta K_{th,X} \le \Delta K_X \le \Delta K_{1-2,X}; \\ +(\Delta K_X - \sqrt{\Delta K_{th,X}\Delta K_{fc,X}})^{q_{2,III}} \\ \text{при} \quad \Delta K_{2-3,X} \le \Delta K_X \le \Delta K_{fc,X}; \end{cases} \\ \dfrac{C_1 \Delta K_X^{n_2}}{\Delta K_{fcl,X}^{n_2-n_1}} \\ \text{при} \quad \Delta K_{1-2,X} \le \Delta K_X \le \Delta K_{2-3,X}, \end{cases}$ сталі 30Л-1 та D9H	[1, 4]



а *б*

Рис. 1. Бази вимірювання (*а*) та параметри залежностей $P_{y,i} - \delta_{x,i}$ в циклі (*б*): $\sigma_{\min,i}$ – мінімальні розтяжні напруження у вістрі тріщини при асиметрії циклу $R > 0$; a, c – довжини довгої наскрізної та короткої тріщин; $P_{op,\Omega} = P_{op,3,6}$, $\Delta\delta_{eff,\Omega} = \Delta\delta_{eff,3,6}$ – рівність зусиль розкриття вістря тріщини і ефективних розмахів її розкриття (достовірно описують розкриття у вістрі тріщини тільки за її росту) на базі вимірювання (відстань від контура пластичної зони до величини 3,6 мм); $\delta_{\min,i}, \delta_{\max,i}$ – мінімальне і максимальне розкриття у вістрі тріщини.

Змінюються в циклі розкриття $\delta_{op,i}$, розмах розкриття у вістрі тріщини $\Delta\delta_i$ та кут нахилу залежностей $P_{y,i} - \delta_{x,i}$. Причиною цього є різні значення переміщення частини зразка з тріщиною, що розташована між точками бази вимірювання y_i. Переміщення зростають зі збільшенням бази вимірювання, що відповідає росту указаних величин. Однак розмах розкриття у вістрі тріщини $\Delta\delta_i$ включає в себе параметр $\Delta\delta_{eff,i}$ (аналогічний $\Delta K_{eff,i}$), який отримано шляхом вилучення з $\Delta\delta_i$ змінної величини $\delta_{op,i}$. Параметр $\Delta\delta_{eff,i}$ описує розмах розкриття у вістрі тріщини тільки при її зростанні, тому цей параметр, як і $\Delta K_{eff,i}$, залишається в циклі сталою величиною.

Результати реєстрації зусилля поточного розкриття вістря втомної тріщини $P_{op,i}$ (на рис. 1 показано в циклі, а в [9, 10] – ще й в часі) свідчать, що в діапазоні зміни зусилля від $P_{\min}$ до P_{op} тріщина розкривається на всьому фронті, а залишкові стискальні напруження з берегів поблизу її вістря (рис. 1,*а*) починають переходити в пластичну зону [9]. При цьому має місце жорстке протистояння між залишковими стискальними напруженнями та зростаючою силою навантаження P. За сили P_{op} жорсткість протистояння послаблюється, тріщина відкривається і починає поширюватися по всьому фронту до сили $P_{\max}$, а залишкові стискальні напруження переходять у пластичну зону (активна частина).

За поступового зниження зусилля від $P_{\max}$ до величини її закриття P_{cl} відбувається перерозподіл стискальних напружень у вістрі тріщини з пластичної зони на береги її вістря, і тріщина починає закриватися. У діапазоні зміни зусилля від P_{cl} до $P_{\min}$ тріщина закрита, а залишкові стискальні напруження перерозподіляються на береги тріщини.

Упродовж навантаження від P_{cl} до P_{op} тріщина залишається нерухомою (відсутнє поширення тріщини, пасивна частина циклу). При цьому залишкові стискальні напруження відмічаються лише у вістрі макротріщини.

Аналіз даних, наведених на рис. 1, свідчить, що сталі в циклі параметри $\Delta\delta_{eff,i}$, $\Delta K_{eff,i}$ (визначені на основі $P_{op,i}$ [6, 17]) більш достовірно описують напружено-деформований стан у вістрі тріщини і є його локальними характеристиками.

Зв'язок між ефективними розмахами КІН $\Delta K_{eff,i}$ та розкриттям вістря тріщини $\Delta\delta_{eff,i}$. Різні автори намагалися отримати інваріантні кінетичні діаграми втомного руйнування (КДВР) відносно асиметрії циклу навантажування R, температури середовища T, розмірів зразків за допомогою залежностей в координатах $da/dN - \Delta\delta$. Таким чином, використовувався розмах розкриття тріщини $\Delta\delta$ як деформаційний параметр, що визначає кінетику росту втомної тріщини. Узагальнення цієї проблеми висвітлено в [18], де відмічається, що величина розмаху розкриття тріщини $\Delta\delta$ інтегрально характеризує реальну ситуацію у вістрі, а її значення можна знайти шляхом прямого вимірювання. Отримані таким чином КДВР в координатах $da/dN - \Delta\delta$ інваріантні відносно асиметрії циклу та товщини зразка для випадків плоскої деформації і плоского напруженого стану [19]. Зауважується [18], що для розмаху розкриття тріщини $\Delta\delta$ як параметра руйнування немає адекватного методу розрахунку в порівнянні з ефективним розмахом КІН ΔK_{eff}. У зв'язку з цим принципово ускладнюється узагальнення результатів досліджень та їх застосування для прогнозування довговічності конструкцій.

У даній роботі отримано регресійні залежності ефективного розмаху розкриття вістря тріщини $\Delta\delta_{eff,i}$ від ефективного розмаху КІН $\Delta K_{eff,i}$ виду $\Delta\delta_{eff,i} = f(\Delta K_{eff,i})$ для сталей 30Л-1, D9H за різних асиметрій R і температур T (рис. 2).

На думку автора, обернена залежність (рис. 3), тобто $\Delta K_{eff,i} = f(\Delta\delta_{eff,i})$, має пряме практичне застосування, яке полягає в тому, що знання параметра розкриття вістря тріщини дозволяє визначити ефективний розмах КІН $\Delta K_{eff,i}$ за формулою, яку отримано емпірично із залежності $\Delta K_{eff,i} = f(\Delta\delta_{eff,i})$.

Із рис. 2 видно, що до величини ефективного розмаху КІН у досліджуваному діапазоні асиметрії циклу навантаження і температури (за широкого діапазону окремої дії різних чинників X) існує одна залежність $\Delta K_{eff,i} - \Delta\delta_{eff,i}$. Для сталі 30Л-1 маємо $\Delta K_{eff,X_1}^{f,inv} = 8{,}3$ МПа$\sqrt{\text{м}}$ (початок розриву ефективної КДВР), для сталі D9H – $\Delta K_{eff,X_1}^{f,inv} = 21{,}8$ МПа$\sqrt{\text{м}}$ (зміна механізму руйнування). Значення $\Delta K_{eff,X_1}^{f,inv}$ визначали з КДВР в координатах $\lg(da/dN) - \lg\Delta K_{eff}$, $\lg\Delta K$ для сталей 30Л-1 та D9H [10]. Руйнування матеріалу в часі за широкого діапазону дії одного та багатьох чинників X протікає незмінно до величин ефективного розмаху КІН [10].

Ефективний розмах поточного розкриття вістря втомної тріщини $\Delta\delta_{eff,i}$ визначали за формулою (рис. 1)

$$\Delta\delta_{eff} = \Delta\delta - \delta_{op}, \qquad (1)$$

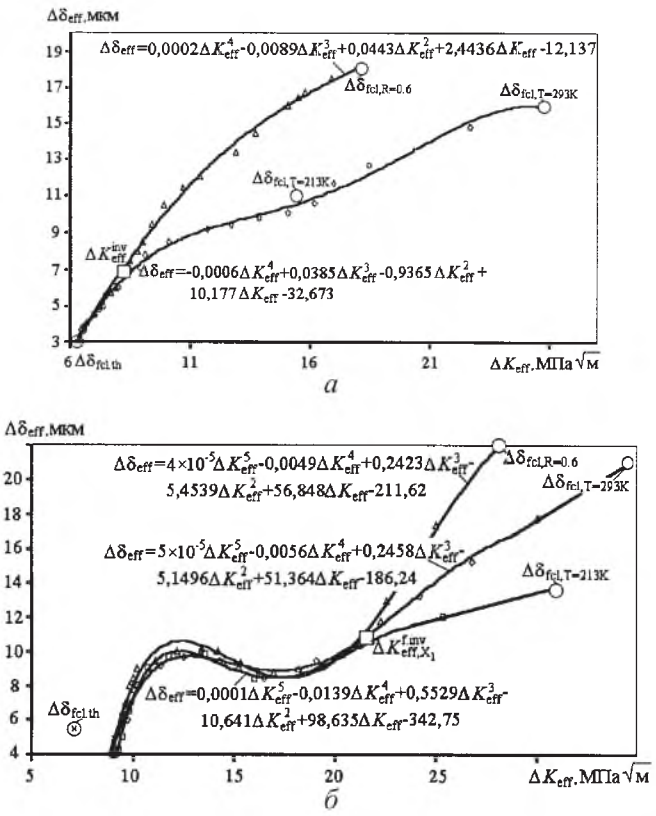


Рис. 2. Залежність ефективного розмаху розкриття вістря втомної тріщини $\Delta\delta_{eff}$ від ефективного розмаху КІН ΔK_{eff} для сталей 30Л-1 (*а*) і D9H (*б*) при частоті навантаження 15 Гц за різних температур та асиметрій циклу: △ – T = 293 К, R = 0,6; ◇ – T = 293 К, R = 0,1; □ – T = 213 К, R = 0,1; × – T = 293 К, R = 0,7 і 0,75 відповідно для указаних сталей; ○ – верхня межа закриття вістря тріщини; □ – величина ефективного розмаху КІН, до якої руйнування матеріалу в часі за широкого діапазону дії багатьох чинників X (температура й асиметрія циклу) протікає адекватно та незмінно.

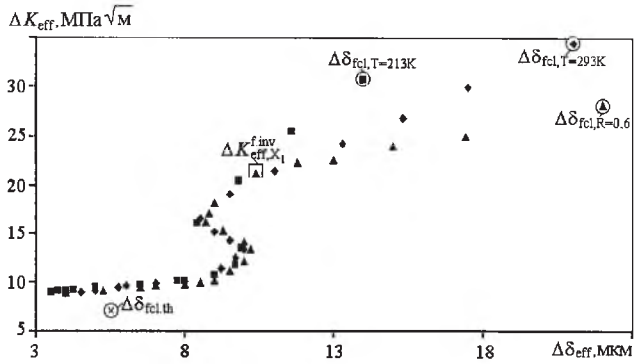


Рис. 3. Залежність ефективного розмаху КІН ΔK_{eff} від ефективного розмаху розкриття вістря втомної тріщини $\Delta\delta_{eff}$ для сталі D9H при частоті навантаження 15 Гц за різних температур та асиметрій циклу: ■ – T = 213 К, R = 0,1; ◆ – T = 293 К, R = 0,1; ▲ – T = 293 К, R = 0,6; × – T = 293 К, R = 0,75; ○ – верхня межа закриття вістря тріщини; □ – величина ефективного розмаху КІН, до якої руйнування матеріалу в часі за широкого діапазону дії багатьох чинників X (температура й асиметрія циклу) протікає адекватно та незмінно.

ефективний розмах КІН $\Delta K_{eff,i}$ – за формулою [6] (рис. 1)

$$\Delta K_{eff} = \Delta K - \Delta K_{cl}^{op}. \qquad (2)$$

Висновки

1. Проаналізовано основні силові концепції оцінки кінетики росту довгої втомної тріщини та механічної ситуації у її вістрі.

2. Установлено достовірний зв'язок між локальними характеристиками силового та деформаційного критеріїв.

Резюме

На основе анализа силовых концепций оценки кинетики роста длинной усталостной трещины и механической ситуации в ее вершине установлена достоверная связь между локальными характеристиками силового и деформационного критериев.

1. *Пиняк И. С.* Влияние закрытия трещины на определяемые характеристики циклической трещиностойкости сталей // Пробл. прочности. – 1998. – № 2. – С. 161 – 171.

2. *Піняк І. С.* Оцінка стану елемента з тріщиною на основі двохпараметричного підходу до його розрахунку на міцність в умовах пружнопластичного руйнування // ІІІ Міжнародна конф. "Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій". – Львів, 2004. – С. 159 – 165.

3. *Pinyak I. S.* Reliability assessment of a component with a crack based on two-parameter method of strength analysis // Integrity for Life: Structural Integrity Assessment for Life Cycle Management. Seventh International / Ed. J. H. Edwards. – Manchester: Emas Publ., 2004. – P. 395 – 405.

4. *Пиняк И. С.* К оценке кинетики упругопластического роста сквозной усталостной макротрещины в металлах при экстремальных и естественных условиях эксплуатации // Пробл. прочности. – 2004. – № 2. – С. 130 – 143.

5. *Paris P. C. and Erdogan F. A.* A critical analysis of crack propagation laws // Trans. ASME, Ser. D. – 1963. – **85**, No. 3. – P. 528 – 536.

6. *Піняк І. С.* Методологія вивчення закономірностей поширення втомної тріщини за критерієм росту – поточним і обмеженим ефективним розмахом КІН // Вибрации в технике и технологиях. – 2001. – № 5. – С. 50 – 53.

7. *Трощенко В. Т., Ясний П. В., Покровский В. В., Скоренко Ю. С.* Методика и некоторые результаты исследования раскрытия трещины усталости // Пробл. прочности. – 1987. – № 10. – С. 8 – 13.

8. *Красовський А. Я., Піняк І. С.* Метод поточного розкриття вістря тріщини в умовах циклічного навантаження // Там же. – 2002. – № 4. – С. 12 – 27.

9. *Пиняк И. С.* Микро- и макроскорость роста усталостной трещины в сталях и сплавах под влиянием закрытия трещины // Там же. – 2002. – № 1. – С. 88 – 101.
10. *Пиняк И. С.* Вязкохрупкий переход в хладноломких металлах при многоцикловом нагружении // Там же. – № 5. – С. 53 – 69.
11. *Forman R. C.*, *Keurney V. E.*, *and Engle R. M.* Numerical analysis of crack propagation in a cyclic-loaded structures // Trans. ASME, Ser. D. – 1967. – **89**, No. 3. – P. 459 – 464.
12. *Ярема С. Я.* О корреляции параметров уравнения Париса и характеристиках циклической трещиностойкости материалов // Пробл. прочности. – 1981. – № 9. – С. 20 – 28.
13. *Elber W.* The significance of fatigue crack closure // Damage Tolerance in Aircraft Structures. – ASTM STP 486. – 1971. – P. 230 – 242.
14. *Schijve J.* Some formulas for the crack opening stress level // Eng. Fract. Mech. – 1981. – **14**, No. 4. – P. 461 – 465.
15. *Марси Г.*, *Хоцяновский А. О.* Экспериментальные методы исследования роста усталостных трещин и концепция ΔK_{eff} // Пробл. прочности. – 1995. – № 7. – С. 13 – 30.
16. *Покровский В. В.*, *Ткач Ю. В.* Прогнозирование развития усталостной трещины при нерегулярном нагружении // Там же. – 1994. – № 8. – С. 3 – 16.
17. *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.
18. *Механика* разрушения и прочность материалов. В 4 т. / Под ред. В. В. Панасюка. – Киев: Наук. думка, 1988–1990.
19. *Трощенко В. Т.*, *Покровский В. В.*, *Каплуненко В. Г.* Влияние размеров образцов на характеристики циклической трещиностойкости теплоустойчивых сталей. Сообщ. 1 // Пробл. прочности. – 1986. – № 4. – С. 3 – 9.

Поступила 18. 02. 2006