

УДК 539.4

Ю.І. Пиндус, к.т.н., доц.  
В.Б. Фостик, аспір.

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

**МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТУ ЗАКРИТТЯ ВТОМНОЇ ТРІЩИНИ  
З ДОПОМОГОЮ ОПТИЧНОГО МЕТОДУ КООРДИНАТНИХ СІТОК**

*Запропоновано методику визначення розкриття втомної тріщини з допомогою оптичного методу з використанням координатних сіток. Обґрунтовано вибір бази вимірювання та відстані від вістря тріщини до бази вимірювання. З використанням вказаної методики побудовано кінетичні діаграми втомного руйнування (КДВР) в ефективних координатах. Отримано задовільне узгодження КДВР, побудованих в ефективних координатах за різних асиметрій циклу навантаження з поправкою Елбера та оптичного методу координатних сіток.*

**Вступ.** Вплив ефекту закриття тріщини (ЗТ) на швидкість росту втомної тріщини (РВТ) вперше був виявлений та обґрунтований Елбером в 70-х роках минулого століття [1, 2]. ЗТ обумовлено тим, що поверхні берегів тріщини позаду вістря залишаються замкненими протягом певної частини циклу навантаження розтягом, а контакт втрачається (відкриття тріщини) лише при певному значенні розтягуючого навантаження  $P_{op}$  [3]. Елбер довів, що доля циклу навантаження, яка лежить нижче значення коефіцієнта інтенсивності напруження (КІН) відкриття тріщини  $K_{op}$ , що відповідає моменту розкриття тріщини, не вносить вкладу в РВТ. ЗТ призводить до зменшення амплітудного значення розмаху КІН  $\Delta K$  до ефективного розмаху КІН  $\Delta K_{eff}$ , який визначається як різниця між максимальним КІН  $K_{max}$  та  $K_{op}$  [2]:

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} \quad (1)$$

Ефект ЗТ кількісно оцінюється коефіцієнтом відкриття тріщини  $U$  [4]:

$$U = (K_{max} - K_{op}) / (K_{max} - K_{min}) = \Delta K_{eff} / \Delta K, \quad (2)$$

де  $K_{min}$  – мінімальне значення КІН циклу навантаження.

Відомо декілька механізмів ЗТ:

- наявність на берегах тріщини пластично здеформованого матеріалу. Таке ЗТ найбільш характерне для матеріалів підвищеної пластичності, навантажуваних за умов плоского напруженого стану [2];
- окиснення поверхонь тріщини в корозійному середовищі, внаслідок чого відбувається розклинювання берегів тріщини продуктами корозії [5];
- шорсткість поверхонь берегів тріщини, яка виникає в результаті РВТ через зерна по відповідних кристалографічних площинах, що веде за собою деформування берегів тріщини за типом II [6, 7];
- збільшення об'єму матеріалу в зоні передруйнування внаслідок локальних фазових перетворень, спричинених механічними напруженнями [8];
- в'язкість середовища, що перешкоджає переміщенню берегів тріщини [9];
- залишкові напруження стиску, які виникають спереду вістря втомної тріщини в пластичній зоні (ПЗ). Наявність таких напружень обумовлено стисканням локальної зони пластично здеформованого матеріалу при розвантаженні зразка. Такий механізм принципово відрізняється від попередніх, оскільки враховує процеси, що відбуваються спереду вістря тріщини, а перелічені вище механізми обумовлені процесами позаду вістря тріщини [4].

Оцінка ЗТ здійснюється в основному експериментальними методами, хоча відомі і аналітичні способи визначення [10, 11]. Відомо багато експериментальних методик визначення параметрів розкриття втомної тріщини [12], зокрема:

- прямого спостереження (оптичний тінювий метод, отримання стереозображень для знімків, реплік, оптичної інтерферометрії);
- непрямого спостереження, який полягає у вимірюванні відстаней між борозенками втоми;
- заснованих на фізичних способах дослідження (електронного потенціалу, ультразвуку, вихрових струмів);
- заснованих на визначенні зміни податливості зразка з тріщиною, які полягають у розміщенні на поверхні зразка різноманітних датчиків та тензодатчиків.

Кінцевою метою вимірювання зусилля розкриття  $P_{op}$  є визначення  $\Delta K_{eff}$  як характеристики, що достовірно описує кінетику РВТ. Таким чином, одержання об'єктивних результатів оцінки явища замикання-розмикання тріщини за умов циклічного навантаження – одна з основних задач експериментальної механіки руйнування.

Вважається, що найбільш достовірні результати оцінки розкриття тріщини можна отримати з використанням методів, які ґрунтуються на вимірюванні зміни податливості зразка з тріщиною. При вимірюванні переміщень поблизу вістря тріщини, діаграма зусилля – розкриття ( $P$ - $\delta$ ) найкращим чином відображає переміщення берегів тріщини [4, 11]. Проте вказані методи мають ряд недоліків: необхідність екстраполяції результатів виміру на вістря втомної тріщини; складність розташування вимірювальних пристосувань безпосередньо у вістрі тріщини, зокрема при проведенні експериментів за низьких або високих температур, що передбачає використання відповідних камер.

Оригінальний спосіб визначення розкриття вістря втомної тріщини запропоновано в роботі [12]. Спосіб дає можливість вимірювати розкриття берегів у вістрі тріщини з постійною базою вимірювання  $b$  рівною 3,6 мм та на відстані від вістря  $r \leq 14$  мкм. Схематично  $b$  та  $r$  показані на рис. 1. Переміщення шупів здійснюється з допомогою мікрометричного гвинта по спеціальних канавках, виконаних по обидва боки тріщини. На думку авторів, використання такої схеми вимірювання розкриття усуває необхідність екстраполяції результатів виміру на вістря втомної тріщини. Також дослідниками встановлено, що  $P_{op}$  і ефективний розмах розкриття  $\Delta\delta_{eff}$  у вістрі втомної тріщини на базі  $\Omega \Omega \leq b \leq 3,6$  мм ( $\Omega\Omega$  – параметр, який характеризує контур ПЗ у вістрі втомної тріщини) залишаються сталими і є правомірними для використання на практиці.

В роботі [13] досліджено вплив  $b$  на залежності розмаху розкриття тріщини  $\Delta\delta$  від  $r$ . Із збільшенням  $b$  від 2,5 до 6,5 мм,  $\Delta\delta$  для сталі 15Х2МФА(Ш) збільшується в 1,1...3 рази в залежності від відстані до вістря тріщини. Абсолютна різниця розмаху  $\Delta\delta$  при різній базі обумовлена зміною рівня розкриття  $\delta_{op}$ . Ріст  $\delta_{op}$  із збільшенням бази вимірювання може бути пояснений таким чином: при навантаженні зразка з тріщиною внаслідок залишкових стискувальних напружень в околі вістря тріщини її береги залишаються замкненими. Тому деформування зразка з тріщиною між точками вимірювання при контакті берегів можна розглядати як пружну деформацію металу бази вимірювання. В цьому випадку збільшення бази вимірювання призводить до збільшення абсолютного видовження  $\Delta\delta$  і величини  $\delta_{op}$ . Відзначається, що під час вимірювання розкриття тріщини необхідно намагатись зменшити базу вимірювання, оскільки в іншому випадку вимірювання переміщення не відповідатиме переміщенню берегів тріщини. Особливо це необхідно враховувати при вимірюванні розкриття берегів втомної тріщини за нерегулярного навантаження. Виходячи з міркувань авторів [12], при вимірюванні  $P_{op}$  необхідно збільшити базу вимірювання  $b$  до розмірів більших ПЗ. Разом з тим, при проростанні тріщини через розширену ПЗ, сформовану переважанням розтягом (рис. 2), збільшення  $b$  до розмірів, більших за ПЗ, може призвести до значних похибок вимірювання, оскільки радіус ПЗ переважання може на порядки перевищувати радіус ПЗ циклу регулярного навантаження базової амплітуди.

Таким чином, вказаний спосіб [12] більш придатний для вимірювання розкриття вістря при циклічному навантаженні із постійним амплітудним значенням.

Очевидно, що за умов нерегулярного навантаження виникає необхідність вимірювати розкриття берегів втомної тріщини, максимально зменшуючи значення  $b$  та  $r$ , безпосередньо в зоні пластичних деформацій.

#### **Метою роботи є:**

- розробка методики дослідження розкриття втомної тріщини з допомогою оптичного методу з використанням координатних сіток;
- оцінка впливу бази вимірювань та відстані від вістря тріщини до бази вимірювань на похибку вимірювання відкриття втомної тріщини.

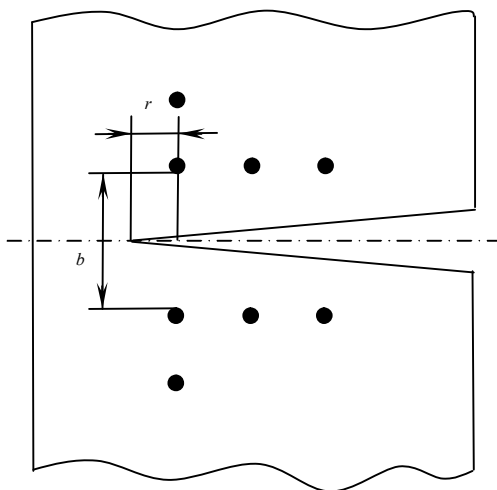


Рис. 1. Схема вимірювання розкриття

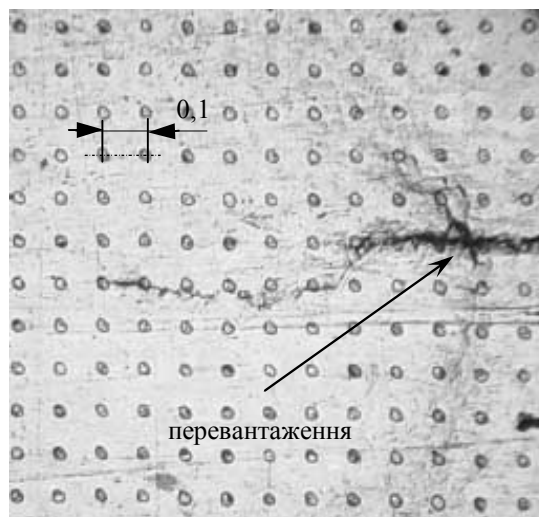


Рис. 2. Вістря втомної тріщини в період проростання через ПЗ, сформовану перевантаженням розтягом, та координатна сітка нанесена на робочу поверхню зразка

**Методика досліджень.** Методика передбачає попереднє фотолітографічне нанесення на гладку поверхню зразка координатної сітки з використанням лако-фоторезистивного захисного покриття та подальшого електрохімічного контурного травлення незахищених ділянок зразка.

Схематично спосіб нанесення координатної сітки проілюстровано на рис. 3. З допомогою фотонабірного апарата ScitexDolev4pressVEG750 створено шаблон (рис. 3, а) вказаної сітки на прозорій плівці. Для переносу зображення шаблону на поверхню зразка використовували позитивний фоторезистивний лак "POSITIV-20", який напилювали на попередньо підготовлену поверхню зразка (рис. 3, б). Для експоненціювання зображення шаблону використовували експонір потужного паралельного ультрафіолетового випромінювання, після чого зображення сітки проявляли розчином NaOH (рис. 3, в). Шляхом подальшого електрохімічного контурного травлення незахищених ділянок зразка (рис. 3, з) протравлювали систему лунок на поверхні зразка (рис. 3, д). Отримано оптимальні режими опромінювання, а також хімічного проявлення та травлення зображення сітки.

Таким чином, отримали сітку із круглих лунок діаметром 0,02 мм та сталим кроком 0,1 мм (рис. 1). Глибина отриманих лунок 2–3 мкм. Така сітка спроможна витримувати значні пластичні деформації та високі температури. Їй властиві достатня точність, сталий крок та контрастність.

Для експериментальних досліджень використовували плоскі прямокутні зразки з центральною тріщиною, виготовлені з алюмінієвого сплаву марки Д16Т, згідно з ГОСТ 25.506-85. На робочій ділянці зразка по обидві сторони від концентратора напружень наносили координатну сітку в напрямку РВТ. Розмір координатної сітки на поверхні зразка 20 x 30 мм. Механічні властивості та хімічний склад алюмінієвого сплаву Д16Т подані в роботі [14].

Розкриття вістря втомної тріщини визначали шляхом періодичного фотографування вістря та прилеглої до нього зони при покроковому збільшенні навантаження на зразок.

Загальний вигляд установки для вимірювання розкриття берегів втомної тріщини на базі сервогідравлічної машини типу СТМ-100 подано на рис. 4. Для фотографування зображення координатної сітки у вістрі тріщини використовували бінокулярний мікроскоп типу МБС-10 з оптичною системою, яка забезпечує 100-кратне збільшення 1, цифрову камеру 2 з роздільною здатністю 6 мегапікселів типу SONY DSC-F717 (з оптичною системою Carl Zeiss). Співвісність камери та мікроскопа забезпечували перехідним кільцем. Для освітлення робочої зони використовували освітлювальний пристрій 3, який забезпечує паралельне когерентне освітлення робочої зони через другий окуляр мікроскопа. Відстань між вузловими точками координатної сітки вимірювали з допомогою програмного комплексу KAPPA Image Base.

Джерело ультрафіолетового випромінювання

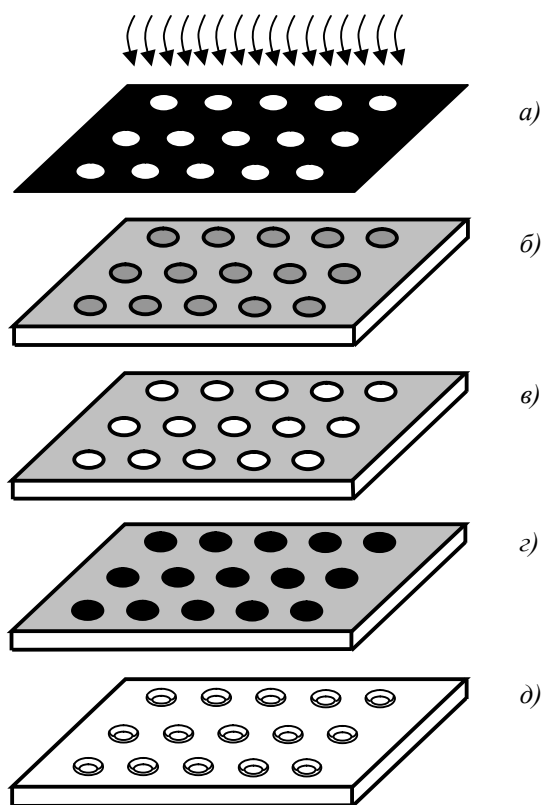


Рис. 3. Методика нанесення координатної сітки на поверхню зразка



а)



б)

Рис. 4. Установка для оптичного вимірювання розкриття берегів втомної тріщини на базі сервогідролічної машини типу СТМ-100

**Оцінка розкриття тріщини.** На рис. 5 подано типову криву  $P-\delta$ , отриману оптичним способом, з допомогою координатної сітки. Вимірювання проводились між лунками, які розміщені найближче до вістря втомної тріщини, забезпечуючи тим самим мінімальне значення  $b$  та  $r$  (рис. 1).

Діаграма  $P-\delta$  складається із 3-х ділянок. Дві прямолінійні ділянки  $ac$  і  $a'c'$ , які мають кут нахилу відповідно  $\beta$  і  $\alpha$  до осі абсцис і відповідають закритій та відкритій тріщині. Ділянка  $ca'$  показує зміну податливості зразка із частково відкритою тріщиною. Слід відзначити, що ділянка  $ac$  вертикальна. Це зумовлено малою базою вимірювання  $b = 0,2$  мм, наслідком чого є незначні пружні деформації основного металу, розміщеного між точками вимірювання. За величину зусилля  $P_{op}$ , по якій визначають значення коефіцієнта інтенсивності напруження розкриття тріщини  $K_{op}$ , приймали ординату точки  $d$ , яка лежить на перетині продовжень апроксимуючих прямих  $ac$  і  $a'c'$  (рис. 5). Розмах розкриття тріщини за такого способу вимірювання визначається за залежністю  $\Delta\delta = \delta_{max} - \delta_{op}$ . У нашому випадку  $\delta_{op} = 0$  і  $\Delta\delta = \Delta\delta_{eff}$ . Достовірність такого підходу обґрунтована в працях [4, 15].

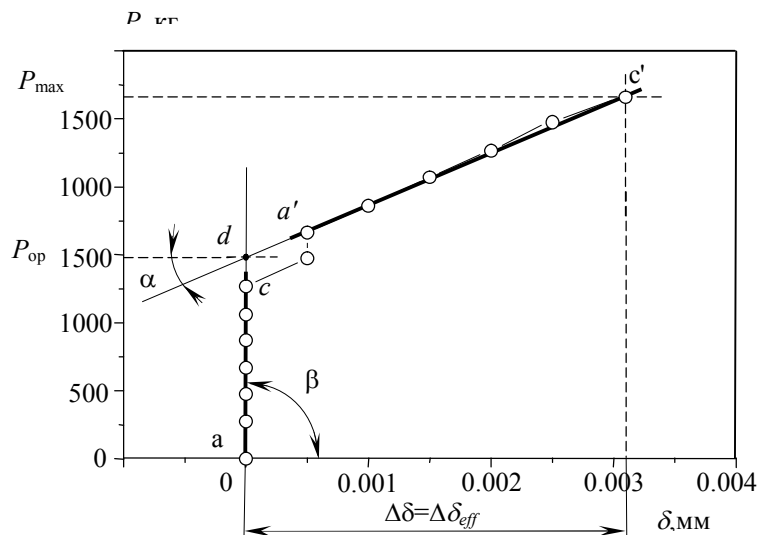


Рис. 5. Типова діаграма  $P-\delta$ , побудована з використанням координатної сітки

**Обґрунтування вибору бази вимірювання  $b$  та відстані від вістря тріщини  $r$ .** Вплив бази вимірювання  $b$  на зміну параметрів розкриття тріщини досліджували при сталій відстані  $r = 0,06$  мм, змінюючи  $b$  від 0,13 до 1,27 мм. Отримані залежності розкриття тріщини у координатах  $K_{max} \sim \delta$  подано на рис. 6.

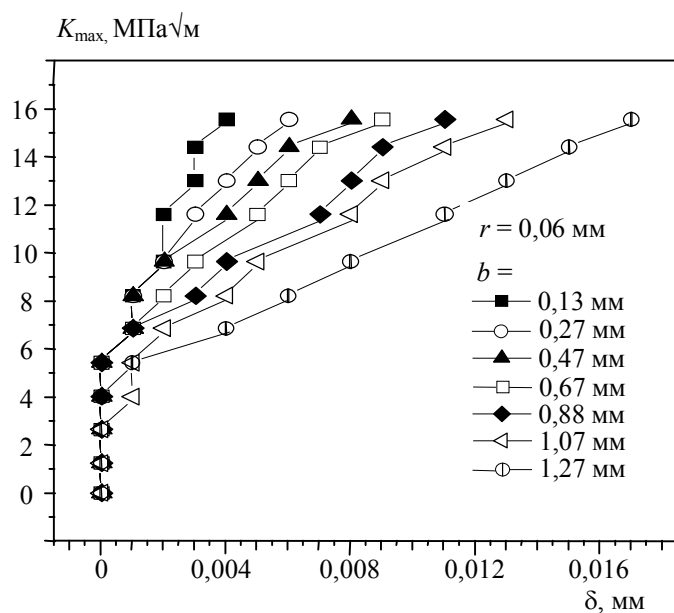


Рис. 6. Вплив бази  $b$  на розкриття берегів втомної тріщини  $\delta$

Як видно із рис. 7, із збільшенням  $b$  спостерігається зниження  $K_{op}$  на 36 % та зростання  $\Delta\delta$  більше ніж в 2,5 раза (рис. 8).

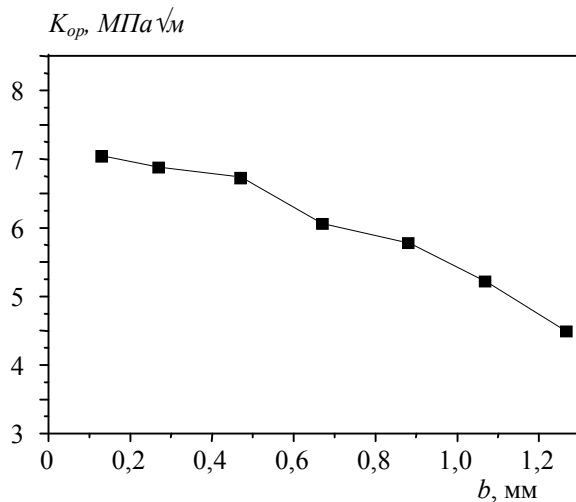


Рис. 7. Залежність  $K_{op}$  від  $b$

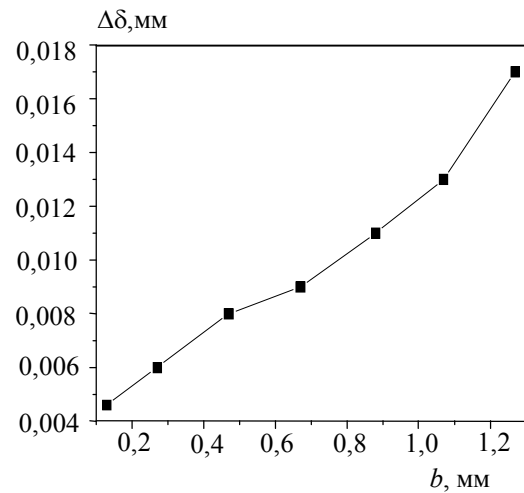


Рис. 8. Залежність  $\Delta\delta$  від  $b$

Вплив  $r$  на параметри розкриття тріщини досліджували при сталій базі  $b = 0,2$  мм, змінюючи  $r$  від 0,06 до 0,76. Діаграму  $K_{max} \sim \delta$  для різних  $r$  подано на рис. 9.

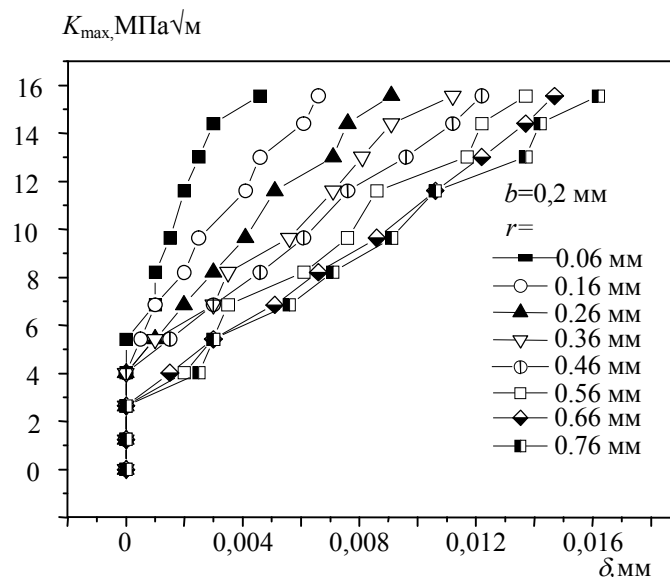


Рис. 9. Вплив бази  $r$  на розкриття берегів втомної тріщини  $\delta$

Закономірності впливу  $r$  на  $K_{op}$  і  $\Delta\delta$  (рис. 10, 11) якісно схожі на аналогічні закономірності при впливі  $b$  на  $K_{op}$  і  $\Delta\delta$  (рис. 7, 8). Проте зменшення  $K_{op}$  є більш значним 65 %, (рис. 10) і  $\Delta\delta$  зростає в 2,5 раза (рис. 11).

Встановлено, що із зростанням  $b$  та  $r$  відбувається зниження  $K_{op}$ . Значення  $\delta_{op}$  залишається практично незмінним і рівним 0, оскільки база вимірювання дуже мала  $b = 0,2$  мм і пружні деформації матеріалу між точками вимірювання незначні. Спостерігається зменшення кута нахилу  $\alpha$  (рис. 5) кривих  $P-\delta$  та зростання  $\Delta\delta$ . Очевидно, що при одночасному збільшенні  $b$  і  $r$  зміну контрольованих параметрів  $K_{op}$  і  $\Delta\delta$  слід розглядати як суперпозицію впливу параметрів  $b$  і  $r$ , що збільшує загальну похибку вимірювання.

Таким чином, пропонується здійснювати вимірювання розкриття берегів втомної тріщини на якомога менших відстанях від вістря тріщини.

Для апробації вказаної методики оцінки  $\Delta K_{eff}$  досліджували швидкість РВТ в алюмінієвому сплаві Д16Т і будували КДВР в координатах  $V \sim \Delta K_{eff}$ .

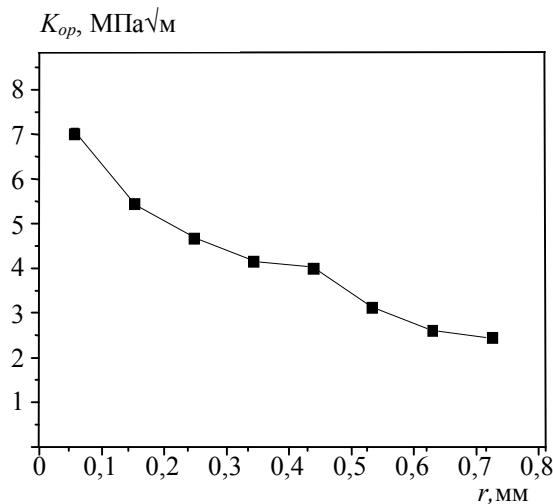


Рис. 10. Залежність зміни  $K_{op}$  від  $r$

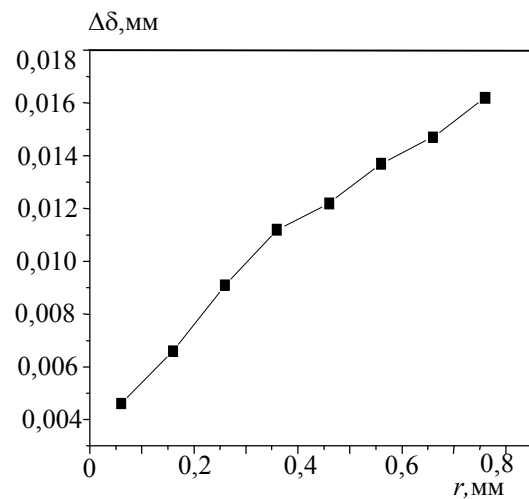


Рис. 11. Залежність зміни  $\Delta\delta$  від  $r$

**Дослідження швидкості РВТ.** Випробування проводили на сервогідравлічній машині типу СТМ-100 з керуючим ПК типу ІВМ РС АТ 286. Температура випробувань 293 К, асиметрія циклу навантаження рівна  $R = 0 \div 0,6$ .

Дослідження РВТ проводили згідно з вимогами [16]. Тріщину ініціювали при зусиллях, які забезпечували б розрахункову швидкість РВТ  $V = 5 \cdot 10^{-8}$  м/цикл. Залікові покази починали знімати при досягненні тріщиною довжини 9 мм в обидва боки від осі зразка.

Розмах КІН визначали за формулою:

$$\Delta K = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot l} \cdot Y, \tag{3}$$

де  $\Delta\sigma = \Delta P/F$  – розмах напруження (брутто) циклу навантаження;  $\Delta P$  – розмах зусилля, прикладеного до зразка;  $F$  – площа поперечного перерізу зразка;  $l$  – половина довжини тріщини;  $Y$  – поправочна функція, яка розраховується за формулою [17]:

$$Y = \left[ 1 - 0,025 \cdot \left( \frac{l}{W/2} \right)^2 + 0,06 \cdot \left( \frac{l}{W/2} \right)^4 \right] \cdot \sqrt{\sec \frac{\pi \cdot l}{W}}, \tag{4}$$

де  $W$  – ширина зразка.

Будували кінетичні діаграми втомного руйнування (КДВР) в координатах  $V \sim \Delta K$  та ефективних  $V \sim \Delta K_{eff}$ .

Для аналітичного опису КДВР за коефіцієнти асиметрії циклу навантаження  $R = 0; 0,2; 0,4; 0,6$  використовували модель Ердогана-Ратвані [18] (рис. 12):

$$V = A \cdot (1 - R)^q \cdot \frac{\left( \frac{\Delta K}{1 - R} - K_{th} \right)^m}{K_{fc} - \frac{\Delta K}{1 - R}}, \tag{5}$$

де  $A = 3 \cdot 10^{-8}$ ,  $m = 2,59$  – сталі матеріалу, визначені методом найменших квадратів при  $R = 0$ ;  $q = 2,6$  – коефіцієнт впливу асиметрії циклу навантаження на КДВР;  $K_{fc} = 51$  МПа√м – в'язкість руйнування при циклічному навантаженні [14].  $K_{th}$  – пороговий КІН:

$$K_{th} = (1 - R)^{(\chi - 1)} \cdot K_{th0}, \tag{6}$$

де  $\chi = 0,57$  – стала матеріалу, яку визначали методом найменших квадратів;  $\Delta K_{th0} = 2,47$  МПа√м – пороговий КІН при  $R = 0$ .

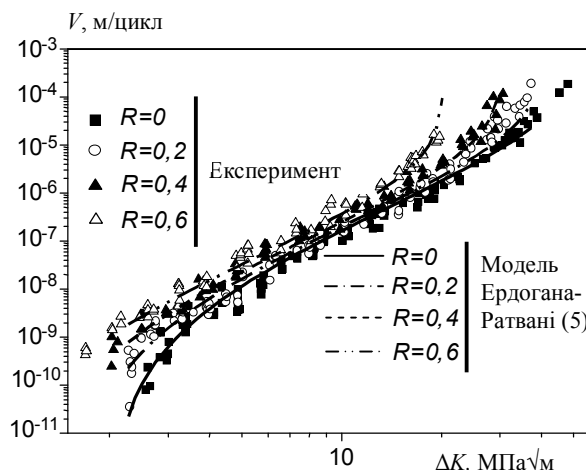


Рис. 12. Кінетичні діаграми втомного руйнування сплаву Д16Т

$\Delta K_{eff}$  обчислювали із формули (2), де  $U = 0,5 + 0,4 \cdot R - 0,1 \cdot R^2$  [19]. Значення  $U$  при різних асиметриях циклу навантаження подано в табл. 1.

Вказане рівняння справедливе за умови:  $-0,1 < R < 0,7$ .

Таблиця 1

Значення коефіцієнта відкриття тріщини  $U$  за різних асиметрій циклу навантаження  $R$

$R$	0	0,2	0,4	0,6
$U$	0,5	0,576	0,644	0,704

Аналitичний опис середньоамплітудної ділянки КДВР в ефективних координатах (рис. 13) здійснювали з допомогою рівняння Періса [20]:

$$V = C(\Delta K_{eff})^n, \tag{7}$$

де  $C = 2,5 \cdot 10^{-10}$ ,  $n = 3,8$  – сталі матеріалу, визначені з експерименту.

Також будували КДВР в координатах  $V \sim \Delta K_{eff}$  з використанням оптичного методу і координатних сіток (рис. 14).

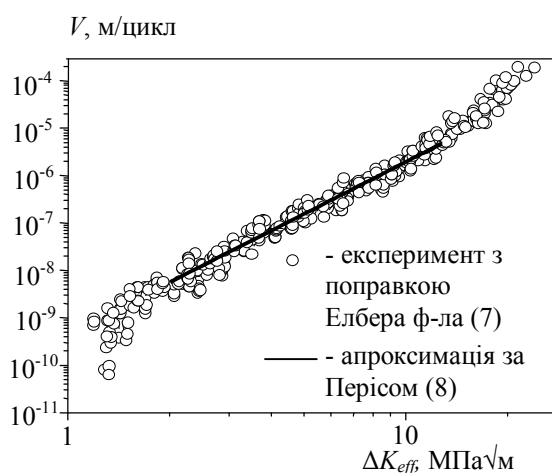


Рис. 13. Кінетичні діаграми втомного руйнування сплаву Д16Т при  $R = 0 \div 0,6$

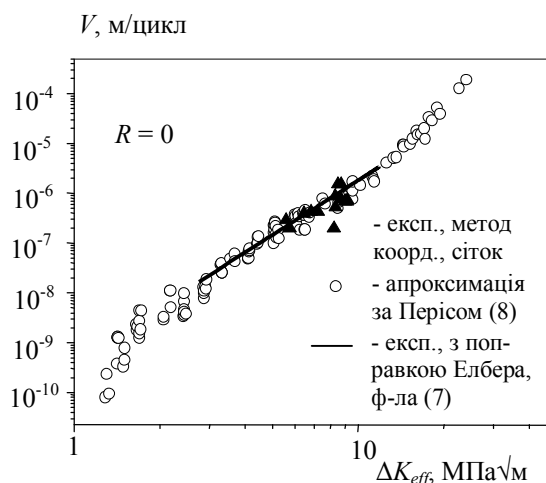


Рис. 14. Кінетична діаграма сплаву Д16Т в ефективних координатах за асиметрії циклу навантаження  $R = 0$

Розмах  $\Delta K_{eff}$  обчислювали за формулою (1).  $K_{op}$  – визначали за формулою:



$$K_{op} = \sigma_{op} \cdot \sqrt{\pi \cdot l} \cdot Y, \quad (8)$$

де  $\sigma_{op} = P_{op}/F$  – максимальне напруження (брутто) циклу навантаження;  $P_{op}$  – зусилля розкриття.

У всіх випадках розкриття берегів тріщини вимірювали між лунками, які розташовані найближче до вістря тріщини. Значення  $b \leq 0,25$  мм і  $r \leq 0,1$  мм.

Як видно з рис. 14, КДВР, отримані з допомогою оптичного методу координатних сіток, задовільно узгоджуються з експериментальними даними швидкості РВТ з врахуванням поправки Елбера.

#### Висновки.

1. Запропоновано спосіб вимірювання розкриття берегів втомної тріщини з допомогою оптичного методу координатних сіток.

2. Встановлено, що збільшення бази вимірювання  $b$  від 0,13 до 1,27 мм при сталому  $r$  призводить до зростання похибки вимірювання  $K_{op}$  на 36 %. Із збільшенням відстані від вістря тріщини  $r$  від 0,06 до 0,76 мм при сталому  $b$  похибка вимірювання  $K_{op}$  зростає на 65 %.

3. Доведено, що для зменшення похибки вимірювання  $K_{op}$ , визначення розкриття тріщини слід проводити при мінімальних значеннях  $b$  і  $r$ .

4. Отримано задовільне узгодження КДВР, побудованих з врахуванням поправки Елбера та з допомогою оптичного методу координатних сіток, що свідчить про ефективність створеної методики.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. *Elber W.* Fatigue crack closure under cyclic tension // Eng. Fract. Mech. – 1970. – 2, № 1. – P. 37–45.
2. *Elber W.* The significance of fatigue crack closure // Damage tolerance in Aircraft structures. – Philadelphia (PA): ASTM STP № 486, 1971. – P. 230–242.
3. *Anderson T.L.* Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications. – Boca Raton: CRC Press, 1991. – 793 с.
4. *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.
5. *Benoit D., Namdar-Irani R., Tixier R.* Oxidation of fatigue fracture surface at low crack growth rate // Mater. Sci. and Eng. – 1980. – 45, № 1. – P. 1–7.
6. *Minakawa K., McEvelly A. J.* On crack closure in near – threshold region // Scr. Met. – 1981. – 15, № 6. – P. 633–636.
7. *Ткач А.Н., Ленец Ю.Н.* Влияние частоты, асимметрии нагружения и структуры стали 10ГН2МФА на закрытие и рост трещин вблизи порога  $\Delta K_{th}$  // Физ.-хим. механика материалов. – 1986. – № 4. – С. 60–67.
8. *Norubogen E.* Martensitic transformation at a propagation crack // Ibid. – 1978. – 26, № 1. – P. 147–152.
9. *Tzou J.-L., Suresh S., Ritchie R.O.* Fatigue crack propagation in oil environments. I. Crack growth behaviour in silicone and paraffin oils // Acta met. – 1985. – 33, № 1. – P. 105–116.
10. *Newman J.C., Armen H.* Elastic-plastic analysis of propagating crack under cyclic loading // AIAA Journal. – 1975. – 13, № 8. – P. 1017–1023.
11. *Newman J.C.* A crack-closure model for predicting fatigue crack growth under aircraft spectrum loading // Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading. – ASTM STM 748, 1981. – P. 53–84.
12. *Красовський А.Я., Піняк І.С.* Метод вимірювання поточного розкриття вістря тріщини в умовах циклічного навантаження // Проблеми прочності. – 2002. – № 4. – С. 12–26.
13. *Ясній П.В.* Пластично деформовані матеріали: втомна і тріщиноотривкість. – Львів: Світ, 1998. – 292 с.
14. *Ясній П., Пиндус Ю., Фостик В.* Вплив асиметрії циклу навантаження на характеристики циклічної тріщиностійкості алюмінієвого сплаву Д16Т // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – Тернопіль: ТДТУ, 2007. – Т. 12. – № 1. – С. 7–12.
15. *Sunder R.* System of automated crack growth testing under random loading // Technical memorandum ТМ-МТ-8-84. – Bangalore: Nat. Aeronat. Lab., 1984. – 23 p.
16. *РД 50-345-82.* Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 95 с.
17. *Johnson W. S.* Multi-Parameter Yield Zone Model for Predicting Spectrum Crack Growth // Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading. -Philadelphia(Pa): ASTM STP № 748. – 1981. – P. 85–102.

18. *Toth L.* Fatigue – A brief historical overview // Proceeding of the 1-st International Conference on Dynamics, Strength and Reliability of Agricultural Machines. – Ternopil, 2004. – P. 10–39.
19. Mechanics of Fatigue Crack Closure. (1988) Edited by J. C. Newman., W. Elber, ASTM STR 982.
20. *Paris P., Erdogan F.* A critical analysis of fatigue propagation laws // Trans. ASME. J.Basic.Eng. – 1963. – 85, № 4. – P. 528–534.

ПИНДУС Юрій Іванович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації технологічних процесів і виробництв Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя.

Наукові інтереси:

– механіка руйнування матеріалів.

Тел. 8(035) 25-35-09

E-mail: [pyndus@tu.edu.te.ua](mailto:pyndus@tu.edu.te.ua)

ФОСТИК Василь Богданович – аспірант кафедри матеріалознавства Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя.

Наукові інтереси:

– механіка руйнування матеріалів.

Тел. 8(035) 25-35-09

E-mail: [fostuk\\_V@yahoo.com](mailto:fostuk_V@yahoo.com)

Подано 04.07.2006