

## Метод вимірювання поточного розкриття вістря тріщини в умовах циклічного навантаження

А. Я. Красовський, І. С. Піняк

Інститут проблем міцності НАН України, Київ, Україна

*Аналіз методів визначення зусилля, що необхідне для розкриття вістря втомної тріщини, дозволив вибрати і обґрунтувати підхід щодо виміру поточного розкриття її вістря. На основі цього підходу розроблено оригінальний метод вимірювання поточного розкриття вістря втомної тріщини, що підрастає, на сталій відстані позаду її вістря.*

**Ключові слова:** датчик, розкриття вістря втомної тріщини, ефективний розмах коефіцієнта інтенсивності напружень.

### Позначення

$P_{op}, \delta_{op}$	– зусилля і розкриття вістря втомної тріщини в циклі
$\delta_c$	– критичне розкриття берегів втомної тріщини в умовах циклічного навантаження
$K_{op}$	– коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) розкриття вістря втомної тріщини в циклі
$K_{fc}$	– критичний КІН в умовах циклічного навантаження
$K_{min}, K_{max}$	– мінімальний і максимальний КІН в циклі
$\Delta K$	– номінальний розмах КІН в циклі, $\Delta K = K_{max} - K_{min}$
$\Delta K_{th}, \Delta K_{fc}, \Delta K_{fcl}$	– відповідно пороговий, критичний і критичний ефективний розмахи КІН в умовах циклічного навантаження
$\Delta K_{cl}^{op}$	– характеристика закриття тріщини в циклі, $\Delta K_{cl}^{op} = K_{op} - K_{min}$
$\Delta K_{eff}$	– ефективний розмах КІН в циклі, $\Delta K_{eff} = \Delta K - \Delta K_{cl}^{op}$
$\sigma_{0,2}$	– умовна границя текучості матеріалу
$\Delta\delta, \Delta\delta_{eff}$	– розмах розкриття вістря втомної тріщини і його ефективне значення в циклі

**Вступ.** Вплив змикання–розмикання вістря втомної тріщини на закономірності її поширення в конструкційних матеріалах оцінюється в основному експериментально. Проводиться реєстрація зусилля в момент розкриття вістря тріщини  $P_{op}$ , визначається КІН  $K_{op}$  й ефективний розмах КІН  $\Delta K_{eff}$ , що формує силовий критерій росту втомної тріщини.

У межах застосування лінійної механіки руйнування закономірності поширення втомної тріщини вивчаються за допомогою обґрунтованого силового критерію, який має суттєві переваги над енергетичними і деформаційними. Ці переваги полягають у тому, що методи, які дозволяють проводити вимірювання розкриття тріщини по лінії дії зусилля з метою визначення  $J$ -інтеграла, а також розкриття її берегів для непрямого визначення

розкриття вістря  $\delta_{op}$  та критичного розкриття берегів тріщини  $\delta_c$ , є менш зручними, аніж методи вимірювання зусилля  $P_{op}$ , що необхідне для розкриття вістря втомної тріщини. В області малоциклового навантаження вказані переваги втрачаються.

На даний час відомо багато експериментальних методів вимірювання зусилля  $P_{op}$ , що необхідне для розкриття вістря втомної тріщини. Запропоновано чимало аналітичних методів розрахунку  $P_{op}$  [1–6], які, на думку авторів, не зможуть знайти практичного застосування внаслідок труднощів, зумовлених достовірністю його визначення.

**Аналіз експериментальних методів визначення зусилля, що необхідне для розкриття вістря втомної тріщини.** Згідно з наведеними в літературних джерелах даними [7–9], методи визначення зусилля можна розділити на чотири основні групи (таблиця).

До *першої групи* відносяться методи прямого спостереження за розкриттям вістря тріщини, якими раніше користувалися різні автори. Так, Сталь і Елен [10] для цього використовували оптичний мікроскоп і телекамеру, а Девідсон [11] – сканувальний електронний мікроскоп. За відсутності відповідної апаратури для визначення дискретних значень зусилля  $P$  за допомогою ацетатної плівки можна отримати репліки профілю тріщини [12, 13], а потім, розглядаючи їх під мікроскопом, знайти зусилля  $P_{op}$ , що відповідає розмиканню берегів тріщини. Проте ще Шін і Сміт [13] відмічали, що за подібних спостережень неможливо точно визначити, коли поверхні тріщини дійсно знаходяться в контакт і несуть навантаження.

Девідсон, Ланкфорд та ін. [14] для визначення зусилля  $P_{op}$  використовували методику отримання стереозображень знімків, які зроблено на сканувальному мікроскопі. Автори робіт [15, 16] для досягнення цієї мети застосовували відповідно оптичну інтерферометрію і оптичний тіньовий метод. Пакман [17] отримав тривимірне зображення закриття тріщини при дослідженні прозорого матеріалу.

Таким чином, на основі вищевказаного необхідно відмітити, що методи прямого спостереження за розкриттям вістря втомної тріщини мають невисоку достовірність результатів дослідження, відзначаються трудомісткістю і не можуть бути використані для вимірювання поточного розкриття вістря втомної тріщини як такого, що весь час вимірюється на постійній відстані позаду рухомого вістря тріщини.


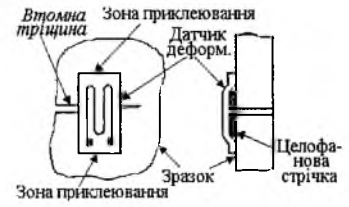
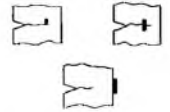
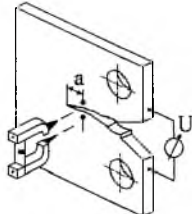
До *другої групи* можна віднести методи непрямого спостереження, що використовуються для визначення зусилля  $P_{op}$  при навантаженні зі змінною амплітудою. Згідно з роботою [18], метод визначення зусилля  $P_{op}$  при навантаженні блоками з постійною амплітудою полягає в тому, що ріст втомної тріщини не відбудеться, якщо максимальне навантаження першого циклу наступного блоку не перевищує величину  $P_{op}$  останнього циклу попереднього блоку,  $P_{\max 2} \leq P_{op1}$ .

На основі робіт Пеллу [19, 20] та Сандера [21], де використовуються борозенки втоми, отримано закономірність: якщо відстань між борозенками втоми малих (наступного блоку) і великих (попереднього блоку) циклів однакова, то мінімальне зусилля й зусилля розкриття вістря втомної тріщини рівні між собою,  $P_{\min 2} = P_{op1}$ .

Експериментальні методи визначення зусилля, що необхідне для розкриття вістря втомної тріщини

Методи оцінки розкриття вістря втомної тріщини	Автори	Рік впровадження	Тип датчика	Основні недоліки методів
1	2	3	4	5
<b>Прямого спостереження</b> використання оптичної інтерферометрії реплік скануючого електронного мікроскопа оптичного мікроскопа отримання стереозображень для знімків оптичний тінювий метод	W. Sharpe, G. Marci S. Matsuoka, C. Shin D. Davidson H. Staal, J. Elen D. Williams R. Herman	1976 1976, 1985 1978 1979 1984 1995	– – – – – –	Неможливо з усією точністю сказати, коли поверхні тріщини дійсно знаходяться у контакті і несуть навантаження, тобто, в який момент часу в циклі навантажування тріщина розкрита. Низька достовірність результатів експерименту і трудомісткість методів, а також неможливість їх використання для визначення поточного розкриття вістря втомної тріщини.
<b>Непрямого спостереження</b> вимірювання відстані між борозенками втомної тріщини наявності зупинки росту втомної тріщини	R. Pelloux, R. Sunder A. De Koning	1967, 1982 1981	– –	Необхідність проведення чисельних експериментальних досліджень. Використовуються тільки для перехідних періодів при циклічному навантаженні зі змінною амплітудою
<b>Засновані на фізичних способах дослідження</b> електричного потенціалу вихрових струмів ультразвуку акустичної емісії фотопружності	C. Beevers, B. Маркочев, D. Jablonski S. Swanson, Г. Нешпор O. Buck, D. Bouami J. Fransen Y. Cheng, P. Pitoniak	1975, 1979 1983 1967, 1977 1973, 1986 1975 1970, 1974	Контакти різні “Крек” датчики Вихрові Ультразвукові Акустичні –	Окисні шари, що утворюються на свіжих поверхнях руйнування, виступають у ролі ізоляторів. Наявність шерсткості і виступів на поверхнях руйнування може спричинити коротке замикання електричного, акустичного сигналу та ін. Немає впевненості в еквівалентності визначення розкриття вістря втомної тріщини відміченими методами і механічними.


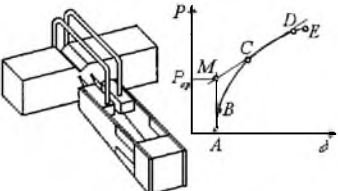
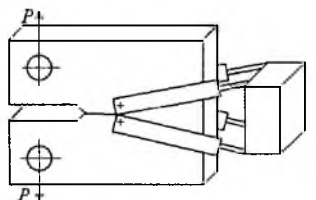
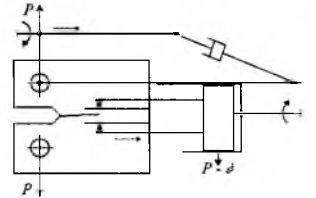
Продовження таблиці

1	2	3	4	5
<p>Реєстрації зміни піддатливості зразка з тріщиною</p>  <p>Втомна тріщина Розміщення датчика 2 мм 1,5 мм</p> <p>Напруження, МН/м<sup>2</sup> 150 100 50 S<sub>cr</sub></p> <p>Попереднє пружне навантаження</p> <p>Переміщення A B C D</p>	<p>W. Elber J. Schijve R. Clerivet C. Bathias</p>	<p>1970 1976 1979 1979</p>	<p>Датчик переміщення</p>	<p>Необхідність проведення інтерполяції результатів виміру на вістря поширюваної втомної тріщини. Неможливість використання для визначення поточного розкриття вістря втомної тріщини.</p>
 <p>Втомна тріщина Зона приклеювання Датчик деформ. Зразок Целофанова стрічка Зона приклеювання</p>	<p>R. Schmidt</p>	<p>1972</p>	<p>Тензодатчик переміщення</p>	<p>Трудомісткість технологічних операцій приклеювання і розміщення тензодатчиків опору на зразку. Необхідність інтерполяції результатів виміру на вістря втомної тріщини і низька достовірність результатів експерименту.</p>
	<p>R. Roberts, R Schmidt P. Paris, D. Gan S. Kawai, P. Liaw H. Tsukuda, J. Schijve</p>	<p>1972 1973, 1981 1982 1995</p>		
	<p>D. Hellmann K. Schwalbe</p>	<p>1981</p>	<p>Скобовий датчик</p>	<p>Необхідність інтерполяції результатів виміру на вістря втомної тріщини. Низька достовірність результатів експерименту. Неможливість використання для визначення поточного розкриття вістря втомної тріщини.</p>

Метод вимірювання поточного розкриття вістря тріщини ...

Продовження таблиці

А. Я. Крисовський, І. С. Піняк

1	2	3	4	5
	J. Clayton	1983	Скобовий датчик	Необхідність інтерполяції результатів виміру на вістря втомної тріщини. Низька достовірність результатів експерименту. Неможливість використання для визначення поточного розкриття вістря втомної тріщини.
	О. Романів Г. Никифорчин Б. Андрусів Н. Куцин	1982	Тензомер	Необхідність інтерполяції результатів виміру на вістря втомної тріщини. Неможливість використання для визначення поточного розкриття вістря втомної тріщини.
	В. Троценко В. Покровський Ю. Скоренко В. Каплуненко	1986		
	І. Піняк	1990	Датчик розкриття вістря тріщини	<b>Перевага методу</b> Вимірюється поточне розкриття вістря втомної тріщини, що відкриває нові можливості для вивчення опору руйнування матеріалу при циклічному навантаженні і комп'ютеризації експерименту.

Недоліками цих методів є труднощі, зумовлені виявленням борозенок втоми для різного класу матеріалів, а також те, що вони можуть використовуватися лише для перехідних періодів зі змінною амплітудою при циклічному навантаженні. Окрім того, для них характерні недоліки першої групи.

До *третьої групи* належать методи, що базуються на фізичних способах дослідження: фотопружності [22, 23]; акустичної емісії [24]; вихрових струмів [25–27] і ультразвукових датчиків [28–30]. Найбільш широко визнаним є метод падіння електричного потенціалу [31–35], що застосовується для визначення довжини тріщини. В основу методу покладено те, що при змиканні берегів тріщини зі зниженням навантаження зменшується ефективна довжина тріщини, а це відповідно впливає на залежність електричного сигналу від прикладеного навантаження. При цьому вимірювання повинні проводитися в момент, коли тріщина відкрита повністю. Однак досвід використання методу показує, що окисні шари, які утворюються на свіжих поверхнях руйнування, можуть виступати у ролі ізоляторів. Більш того, наявність шорсткості та виступів на поверхнях руйнування може призвести до короткого замикання електричного сигналу, що дасть неправильні результати виміру. Очевидно, що між електричним та механічним способами визначення зусилля  $P_{op}$  немає еквівалентності. Ці основні недоліки свідчать про те, що метод електричного потенціалу мало придатний для визначення зусилля  $P_{op}$ .

Застосування методу вихрових струмів дозволяє в деякій мірі керувати глибиною проникнення вихрових струмів шляхом регулювання частоти. Проте можливості методу досить низькі. Він має такі ж недоліки, як і метод падіння електричного потенціалу.

Методи фотопружності, ультразвуковий та акустичної емісії в порівнянні з механічним методом також не дають впевненості в еквівалентності визначення зусилля  $P_{op}$ .

Підкреслимо, що кінцевою метою виміру зусилля  $P_{op}$  є визначення ефективного розмаху КІН  $\Delta K_{eff}$  як характеристики, що достовірно описує кінетику росту втомної тріщини. Таким чином, одержання достовірних результатів оцінки явища змикання–розмикання тріщини – основна задача експериментальної механіки руйнування в умовах циклічного навантаження.

Досягнути вказаної мети можна лише за умови використання методів, в основі яких лежить реєстрація зміни піддатливості зразка з розвитком тріщини. Саме ці методи і складають основну, *четверту групу* експериментальних методів визначення зусилля  $P_{op}$ .

Згідно з цими методами проводиться вимірювання деформації  $\varepsilon$  або переміщення  $\delta$  поблизу вістря втомної тріщини у залежності від зусилля  $P$  ( $P - \delta$ ). Із отриманих залежностей  $P - \delta$  визначається зусилля розкриття вістря втомної тріщини  $P_{op}$ . Наскільки нам відомо, в літературних джерелах не існує єдиної думки щодо визначення зусилля  $P_{op}$ . Більшість дослідників користуються методом, що запропонував Елбер [36], схема його реалізації показана в таблиці. Суть методу полягає у тому, що зусилля розкриття вістря втомної тріщини  $P_{op}$  повинно відповідати тому мінімальному значенню зусилля  $P$ , за якого тріщина розкрита повністю. Розрахунок КІН розкриття

вістря втомної тріщини  $K_{op}$  проводиться згідно з методичними вказівками [37], а ефективний розмах КІН  $\Delta K_{eff}$  визначається за формулою

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

де  $K_{max}$  – максимальний КІН в циклі.

Для визначення зусилля  $P_{op}$  Елбер [36] використав високочутливий датчик переміщення, гострокінцеві шупи якого закріплюються з обох сторін зразка на відстані  $x = 2$  мм позаду вістря тріщини. Він отримав залежність  $P - \delta$ , за допомогою якої визначив зусилля  $P_{op}$  і КІН  $K_{op}$  розкриття вістря втомної тріщини, що необхідні для знаходження ефективного розмаху КІН  $\Delta K_{eff}$ .

Шмідт [38] для вимірювання зусилля  $P_{op}$  розробив простий датчик деформації, що перетинає фронт тріщини. Датчик наклеюється двома кінцями на зразок, тобто працює як датчик переміщення Елбера.

Відомо, що автори робіт [39–44] наклеювали на зразок із тріщиною тензометричні, малогабаритні датчики опору за схемами, наведеними в таблиці, й визначали зусилля  $P_{op}$ .

Швальбе [45], Клейтон [46] з метою знаходження зусилля  $P_{op}$  використовували скобові датчики (скоба з приєднаним тензометричним мостом), які обладнані гострими сталевими штирями й розміщені в лунках. Лунки виконано на зразку індентором Віккерса симетрично фронту тріщини позаду її вістря.

Романів і Никифорчин [8, 47], Трощенко і Покровський [48] застосували тензометри, в яких тензодатчики наклеєні на пружних елементах, що закінчуються гострими контактами. Тензометр своїми контактами розміщується в лунках, виконаних симетрично фронту тріщини позаду її вістря з обох сторін зразка, й утримується за рахунок пружності елементів датчика.

Проведені експерименти показали [8, 47], що за умов циклічного навантаження зразка для визначення зусилля  $P_{op}$  потрібно дотримуватися запропонованого методу Романіва (схема його реалізації показана в таблиці), а не Елбера. Основна перевага методу Романіва – це урахування явища змикання–розмикання вістря втомної тріщини по товщині зразка.

Аналіз будь-якого методу четвертої групи свідчить, що основний їхній недолік полягає в необхідності інтерполяції даних виміру зусилля  $P$  й переміщення  $\delta$  на вістря поширюваної втомної тріщини, що суттєво знижує достовірність результатів експерименту. У зв'язку з цим актуальною є задача створення й реалізації підходу, що визначав би поточні (вимірюються весь час на сталій відстані від вістря тріщини в процесі її поширення) значення зусилля  $P_{op}$  і розкриття  $\delta_{op}$  вістря втомної тріщини. Такий підхід реалізується за допомогою методу, що схематично відображено в таблиці й досконалим висвітлено в роботі [49].

**Підхід до визначення поточного розкриття вістря втомної тріщини й установка для його практичної реалізації в ручному режимі.** Суть підходу [49] полягає в тому, що на бокових поверхнях зразка  $l$ , симетрично лінії передбачуваного росту тріщини нарізуються дві пари канавок глибиною  $z \leq 0,2$  мм на відстані одна від одної (база вимірювання)  $y \leq 3,6$  мм (рис. 1).

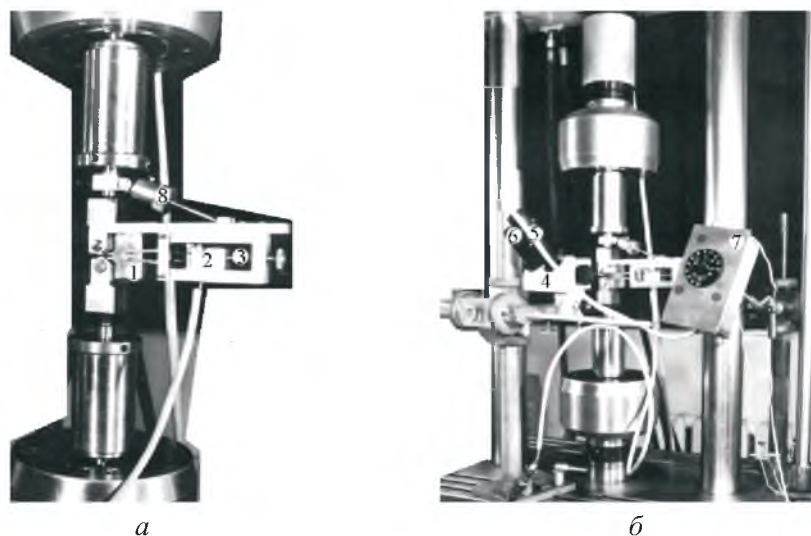


Рис. 1. Установка для вимірювання в ручному режимі поточних значень зусилля  $P_{op}$  і розкриття  $\delta_{op}$  вістря тріщини (а, б), а також її довжини (б).

Голки щупів датчика 2 розміщуються в канавках (реалізується спосіб, що описаний в [50]). По мірі росту тріщини голки щупів датчика переміщуються в канавках за допомогою мікрометричного гвинта 3 в ручному режимі так, щоб черговий замір переміщення  $\delta$  берігів вістря поширюваної наскрізної втомної тріщини у вертикальному напрямку виконувався позаду, на сталій відстані від її вістря,  $x \leq 14$  мкм (реалізується установка, що описана в [51]).

Довжина тріщини вимірюється за допомогою оптичного мікроскопа 4 типу МБС-9, що має можливість переміщуватися в горизонтальному напрямку вздовж лінії росту тріщини. Один окуляр 5 мікроскопа освітлюється стробоскопом 7, а інший окуляр 6 використовується для вимірювання довжини тріщини. Одночасно вимірюється довжина тріщини і реєструються поточні значення залежності  $P - \delta$  в циклі. Інерція маси корпусу датчика гаситься за допомогою телескопічного демпфіруючого вузла 8.

Поточні значення зусилля  $P_{op}$  і розкриття  $\delta_{op}$  вістря наскрізної втомної тріщини знаходять із залежностей  $P - \delta$  за методом Романіва [8, 47] (таблиця). Визначається КІН розкриття тріщини  $K_{op}$  у відповідності з методикою [37] за формулою

$$K_{op} = \frac{P_{op}}{t\sqrt{b}} Y,$$

при цьому

$$Y = \sqrt{\frac{\lambda}{(1-\lambda)^3}} (9,172 - 13,829\lambda + 11,822\lambda^2 - 3,056\lambda^3), \quad (2)$$

де  $t$  і  $b$  – розміри зразка;  $\lambda = l/b$  – безрозмірний коефіцієнт;  $l$  – початкова довжина тріщини. На основі отриманих КІН розкриття вістря втомної тріщини  $K_{op}$  визначається ефективний розмах КІН  $\Delta K_{eff}$  за формулою [49]



$$\Delta K_{eff} = \Delta K - \Delta K_{cl}^{op}. \quad (3)$$

Характеристика закриття тріщини  $\Delta K_{cl}^{op}$  визначається наступним чином:  $\Delta K_{cl}^{op} = K_{op} - K_{min}$  [52], де  $\Delta K$  – номінальний розмах КІН в циклі;  $K_{min}$  – мінімальний КІН в циклі.

**Установка для вимірювання в автоматичному режимі поточного розкриття вістря втомної тріщини і її довжини.** Функціональна схема установки [53] представлена на рис. 2. До складу установки входить пристрій навантаження, що містить захоплювачі (на рис. 2 не показано) для кріплення зразка 1, освітлювач 2, щілинну діафрагму поздовжнього сканування 3 (виконана у вигляді пластини з прямокутним отвором), пристрій поздовжнього сканування 4, що містить опору, електродвигун, редуктор, пару гвинт–гайка (повністю не показано), датчик довжини тріщини з першим реєструючим приладом 5, щілинну діафрагму поперечного сканування 7 (виконана у вигляді пластини з прямокутним отвором), пристрій поперечного сканування 8, що містить звуковий генератор і електродинамічний вібратор (не показано), об'єктиви 6 і 9, фотоприймач 10, підсилювач фотоструму 11, пороговий пристрій 12, датчик розкриття вістря тріщини 13, другий реєструючий прилад 14 – реєстратор розкриття вістря тріщини, що містить підсилювач і вольтметр. Об'єктив 6 розміщений між щілинною діафрагмою поздовжнього сканування і щілинною діафрагмою поперечного сканування, об'єктив 9 – між щілинною діафрагмою поперечного сканування і фотоприймачем. Об'єктиви, щілинні діафрагми поздовжнього і поперечного сканування та фотоприймач розміщуються на одній оптичній осі. Пристрій поперечного сканування кінематично з'єднаний з діафрагмою поперечного сканування. Вихід фотоприймача електрично підімкнений до входу підсилювача фотоструму, вихід останнього – до входу порогового пристрою, вихід якого – до входу пристрою поздовжнього сканування, механічно зв'язаного з датчиком розкриття вістря тріщини, вихід якого електрично з'єднаний з другим реєстратором розкриття вістря тріщини 14. Датчик довжини тріщини електрично зв'язаний з першим реєструючим приладом 5 і кінематично – з пристроєм поздовжнього сканування 4.

Працює установка наступним чином. Світловий пучок від освітлювача через щілинну діафрагму поздовжнього сканування виставляється на полірованій поверхні зразка з тріщиною. За умови розміщення вістря тріщини по центру щілинної діафрагми поздовжнього сканування він відбивається від поверхні зразка і фокусується об'єктивом 6 у центр щілинної діафрагми поперечного сканування. Остання здійснює сканування вістря тріщини по висоті зразка. Об'єктив 9 фокусує світловий пучок на фотоприймач, з виходу якого фотострум поступає на вхід підсилювача, що побудований на мікросхемі операційного підсилювача К140УД6. Далі сигнал поступає на вхід порогового пристрою, в основі якого лежить мікросхема компаратора напруги 521СА3. На виході підсилювача фотоструму виникає напруга, що рівна пороговій напрузі. Щілинна діафрагма пристрою поздовжнього сканування в цей момент нерухома, а голки щупів датчика розкриття вістря тріщини знаходяться у вістрі досліджуваної тріщини зразка.

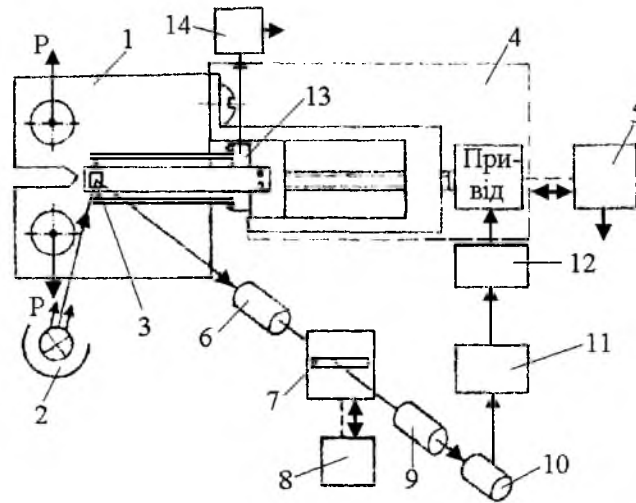


Рис. 2. Функціональна схема установки для вимірювання в автоматичному режимі поточного розкриття вістря втомної тріщини і її довжини: 1 – зразок; 2 – освітлювач; 3 – щілинна діафрагма поздовжнього сканування; 4 – пристрій поздовжнього сканування; 5 – датчик довжини тріщини з першим реєструючим приладом; 6 – перший об'єктив; 7 – щілинна діафрагма поперечного сканування; 8 – пристрій поперечного сканування; 9 – другий об'єктив; 10 – фотоприймач; 11 – підсилювач фотоструму; 12 – пороговий пристрій; 13 – датчик розкриття вістря тріщини; 14 – другий реєструючий прилад.

Переміщення гвинта пристрою поздовжнього сканування 4 вимірюють датчиком довжини тріщини з першим реєструючим приладом 5 (за цією величиною судять про довжину тріщини), а розкриття тріщини – датчиком розкриття вістря тріщини з другим реєструючим приладом 14. При зміщенні вістря тріщини вправо від центру щілинної діафрагми поздовжнього сканування на виході підсилювача фотоструму виникає напруга, що більша за порогове значення. Пороговий пристрій подає сигнал пристрою поздовжнього сканування на зміщення щілинної діафрагми до збігання її центру з вістрям тріщини. Якщо вістря тріщини зміщене вліво від центру щілинної діафрагми, то на виході підсилювача фотоструму виникає напруга, що менша за порогове значення, і пороговий пристрій подає сигнал на зміщення щілинної діафрагми до збігання її центру з вістрям тріщини.

**Метод поточного розкриття вістря поширюваної наскрізної втомної тріщини перевірено на практиці** при експериментальному дослідженні закономірностей росту втомної тріщини в сталях 30Л-1, D9H. Ці сталі використовуються для виготовлення боковин промислових тракторів Т-330 (Росія) і Катерпілер (США) для роботи на Півночі.

Достовірно описано кінетику росту втомної тріщини (РВТ) в координатах  $\lg da/dN - \lg \Delta K_{eff}$ ,  $\lg \Delta K$ . Запропоновано нові характеристики циклічної тріщиностійкості конструкційного матеріалу, що дозволяють описати важливі ефекти при поширенні наскрізної втомної тріщини [52, 54, 55].

Експериментально перевірено [49, 52] вірогідність розробленого методу й показано, що нанесені конічні канавки на бокових поверхнях зразка в напрямку передбачуваного росту втомної тріщини (горизонтальному) глибиною  $z \leq 0,2$  мм практично не впливають на її поширення.

Значення залежності  $P - \delta$  в циклах реєструвалися поточно (безперервно) на бокових поверхнях компактного зразка у рухомому вістрі наскрізної втомної тріщини,  $x \leq 14$  мкм (фактично у її кінчику на поверхнях зразка). Однак наскрізна втомна тріщина поширюється кривиною по її фронту, що вносить похибку у вимірювання зусилля  $P_{op}$  в циклі по товщині зразка. Метод Романіва [8] (таблиця) дозволяє середньо ураховувати явище змикання–розмикання вістря наскрізної втомної тріщини в циклі по товщині зразка через графічно знайдені величини  $P_{op}$  і  $\delta_{op}$ . Ці величини визначаються із залежності  $P - \delta$  в циклах (таблиця) як пересічення дотичних променів  $AM$  і  $DM$  (продовження пружних ділянок  $AB$ ,  $CD$  залежності  $P - \delta$ ) до пружнопластичної ділянки  $BC$  при деформуванні матеріалу по товщині зразка в циклі. Знайдене таким чином зусилля  $P_{op}$  (точка  $M$  на схемі Романіва в таблиці) в циклі дозволяє вважати, що воно відповідає зусиллю розкриття вістря поширюваної наскрізної втомної тріщини в центрі кривини фронту по товщині зразка.

При визначенні КІН  $K_{op}$  вимірювалася середня довжина поширюваної наскрізної втомної тріщини (заміри проводилися на інструментальному мікроскопі в п'яти поздовжніх перетинах поверхні злому дослідженого зразка), що відповідає довжині тріщини в центрі кривини її фронту по товщині зразка. Заміри проводилися у відповідності до методичних вказівок [37].

**Вибір бази у вимірювання зусилля  $P_{op}$**  проводився наступним чином.

1. На основі методичних вказівок [37] і роботи [49] проводилися випробування компактних зразків на позацентровий розтяг зі сталей D9H, 30JL-1. Визначався обмежуваний лінійно-пружною механікою руйнування радіус

монотонної  $r_p = \frac{1}{6\pi} \left( \frac{K_I}{\sigma_{0,2}} \right)^2$  пластичної зони у вістрі поширюваної наскріз-

ної втомної тріщини на бокових поверхнях зразків і будувалися кінетичні діаграми втомного руйнування (КДВР) в логарифмічних ефективних і номінальних координатах  $-\lg da/dN - \lg \Delta K_{eff}$ ,  $\lg \Delta K$  [52, 54, 55].

2. Визначалися пороговий  $\Delta K_{th}$ , критичний  $\Delta K_{fc}$  і критичний ефективний  $\Delta K_{fcl}$  розмахи КІН [52], а також зміна радіуса монотонної пластичної зони в межах отриманих КДВР для досліджених сталей,  $0,1 \text{ мм} \leq r_p \leq 2 \text{ мм}$ .

3. Отримані КДВР розбивалися на три ділянки, що мають початок і кінець. Перераховувалися і розмічалися границі ділянок на полірованих бокових поверхнях компактних зразків, що використовувалися для дослідження бази вимірювання  $y$  (розміри зразків відповідають розмірам випробуваних зразків на кінетику РВТ).

4. На бокові поверхні зразків перпендикулярно лінії передбачуваного росту наскрізної втомної тріщини наносилася розмічувальна сітка з кроком вимірювання 1 мм у горизонтальному напрямку (поширення тріщини). На кожній лінії сітки у вертикальному напрямку індентором Віккерса наносилися лунки з базами [49] вимірювання  $y = 0,5; 1,5; 2,5; 3,6$  мм для першої та другої ділянок КДВР. На третій ділянці КДВР лунки не наносилися, оскільки там відсутнє закриття вістря втомної тріщини.

5. За допомогою датчика поточного розкриття вістря тріщини реєструвалися залежності  $P - \delta$ , з яких визначалися зусилля  $P_{op}$  і розкриття  $\delta_{op}$  вістря поширюваної наскрізної втомної тріщини в циклі. Голки датчика виставляли по черзі в лунки з різними базами тоді, коли вістря наскрізної втомної тріщини на поверхнях зразка сягало вимірюваної лінії сітки.

6. За умови розміщення голок датчика в лунках, що охоплені пластичною зоною, характер побудованих залежностей  $P - \delta$  подібний до характеру залежностей  $P - \delta$ , що отримані за сильних зовнішніх перешкод. Із таких залежностей практично неможливо визначити зусилля  $P_{op}$  і розкриття  $\delta_{op}$  вістря поширюваної наскрізної втомної тріщини в циклі.

7. При розміщенні голок датчика в лунках, що попадають на границю між зонами пластичного і пружного деформування контуру біля вістря втомної тріщини, на поверхнях зразка і аж до верхнього діапазону прийнятої нами бази вимірювання ( $y = 3,6$  мм) розкриття вістря втомної тріщини зусилля  $P_{op}$  залишалося сталим. Проте змінювалися розкриття  $\delta_{op}$ , розмах розкриття  $\Delta\delta$  у вістрі втомної тріщини і кут нахилу залежностей  $P - \delta$ . Ефективний розмах розкриття  $\Delta\delta_{eff}$  вістря втомної тріщини [49] залишався без змін. Аналогічні результати отримано в [56] на базі вимірювання розкриття вістря втомної тріщини ( $2,5 \text{ мм} \leq y \leq 6,4 \text{ мм}$ ) для сталей 15X2МФА(І), 15X2МФА(ІІ).

8. Виміряні зусилля  $P_{op}$  і ефективний розмах розкриття  $\Delta\delta_{eff}$  вістря втомної тріщини на базі  $\Omega \leq y \leq 3,6$  мм ( $\Omega$  – параметр, який характеризує контур пластичної зони у вістрі втомної тріщини) будуть правомірними при використанні на практиці і при дослідженні закономірностей поширення втомної тріщини в сталях 30Л-1, Д9Н та ін.

## Висновки

1. Проведено критичний аналіз існуючих методів визначення зусилля  $P_{op}$ , що необхідне для розкриття вістря втомної тріщини.

2. На основі одержаних даних розроблено оригінальний метод вимірювання в ручному й автоматичному режимі поточного розкриття  $\delta_{op}$  і зусилля  $P_{op}$  вістря поширюваної втомної тріщини на сталій відстані від її вістря, що усуває похибки, пов'язані з інтерполяцією результатів виміру на вістря тріщини.

## Резюме

Анализ методов определения усилия, необходимого для раскрытия вершины усталостной трещины, позволил выбрать и обосновать подход к измерению текущего раскрытия ее вершины. На основе подхода разработан оригинальный метод измерения текущего раскрытия вершины подрастающей усталостной трещины на неизменном расстоянии позади ее вершины.

1. Newman J. C. and Armen H. Elastic-plastic analysis of a propagating crack under cyclic loading // AIAA Journal. – 1975. – 13, No. 8. – P. 1017 – 1023.

2. Макчауен Ж. Ж., Лю Г. В. Роль трехмерных эффектов при экспериментальном исследовании роста усталостных трещин в условиях постоянной амплитуды // Теорет. основы инж. расчетов. – 1980. – **102**, № 4. – С. 27 – 33.
3. Fuhring H. and Seeger T. Structural Metory of Cracked Components under Irregular Loading // ASTM STP 677, 1979. – P. 144 – 167.
4. Banerjee S. Crack closure in fatigue. Mechanisms and prediction // Transactions of the Indian Institute of Metals. – 1985. – **38**, No. 2. – P. 167 – 186.
5. Dill H. D. and Saff C. R. Spectrum crack growth prediction method based on crack surface displacement and contact analyses // Fatigue Crack Growth under Spectrum Loads. – ASTM STP 595, 1976. – P. 306 – 319.
6. 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 STP 748, 1981. – P. 53 – 84.
7. Сиратори М., Миеси Т., Маусита Х. Вычислительная механика разрушения. – М.: Мир, 1986. – 334 с.
8. 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.
9. Fleck N. A. Fatigue crack growth – the complications // Proc. of the Conf. on Fatigue Crack Growth: 30 Years of Progress, 1984. – Cambridge, 1986. – P. 75 – 88.
10. Staal H. U. and Elan J. D. Crack closure and influence of cycle ratio  $R$  on fatigue crack growth in type 304 stainlees steel at room temperatures // Eng. Fract. Mech. – 1979. – **11**, No. 2. – P. 275 – 283.
11. Davidson D. L. and Nady A. Scientific instruments // J. Phys., E. – 1978. – No. 11. – P. 207 – 210.
12. Matsuoka S., Tanaka K., and Kawahara M. The retardation phenomenon of fatigue crack growth in HT80 Steel // Eng. Fract. Mech. – 1976. – 8, No. 3. – P. 507 – 523.
13. Shin C. S. and Smith R. A. Fatigue crack growth mechanisms // Int. J. Fatigue. – 1985. – No. 7. – P. 87 – 93.
14. Williams D. R., Davidson D. L., and Lankford J. Stereofractography application to define the fatigue crack opening // Exp. Mech. – 1984. – No. 20. – P. 134 – 139.
15. Sharpe W. N. and Grandt A. F. A preliminary study of fatigue crack retardation using laser interferometry to measure crack surface displacements // Mechanics of Crack Growth. – ASTM STP 590, 1976. – P. 302 – 320.
16. Herman R. and Bull C. Application of the shadow optical method to fatigue and crack closure studies // Strain. – 1995. – **31**, No. 3. – P. 101 – 106.
17. Packman P. F. Society of experimental stress analysis // Exp. Tech. Fract. Mech. – 1975. – No. 2. – P. 59 – 87.

18. *De Koning A. U.* A simple crack closure model for prediction of fatigue crack growth rates under variable amplitude loading // *Fracture Mechanics*. – ASTM STP 743, 1981. – P. 63 – 85.
19. *McMillan J. C. and Pelloux R. M.* Fatigue crack propagation under program and random loads // *Fatigue Crack Propagation*. – ASTM STP 415, 1967. – P. 505 – 543.
20. *Pelloux R. M., Faral M., and McGee W. M.* Fractographic measurements of crack-tip closure // *Fracture Mechanics*. – ASTM STP 700, 1980. – P. 35 – 48.
21. *Sunder R. and Dash P. K.* Measurement of fatigue crack closure through electron fractography // *Int. J. Fatigue*. – 1982. – No. 4. – P. 97 – 105.
22. *Cheng Y. E. and Bruner M.* Photoelastic research in progress on fatigue crack closure // *Int. J. Fract. Mech.* – 1970. – 6, No. 4. – P. 431 – 434.
23. *Pitoniak P. B., Grandt A. F., Montulli L. T., and Packman P. F.* Fatigue crack retardation and closure in polymethylmethacrylate // *Eng. Fract. Mech.* – 1974. – 6, No. 4. – P. 663 – 670.
24. *Fransen J. D., Inman R. V., and Buck O.* A comparison of acoustic and strain gauge techniques for crack closure // *Int. J. Fract.* – 1975. – No. 11. – P. 345 – 348.
25. *Лал К. М., Гарг С. Б., Ленэй И.* Об эффективном коэффициенте размаха напряжений при усталости // *Теорет. основы инж. расчетов*. – 1980. – 102, № 1. – С. 98 – 104.
26. *Swanson S. R., Cicci F., and Hoppe W.* Crack propagation in 7079-T6 aluminum alloy sheet under constant and random amplitude loading // *Fatigue Crack Propagation*. – ASTM STP 415, 1967. – P. 312 – 362.
27. *Неупор Г. С., Миклеев П. В., Грецьких С. В.* Усовершенствованная установка для автоматической записи трещины в листовых образцах // *Завод. лаб.* – 1977. – № 4. – С. 501.
28. *Ho C. L., Buck O., and Marcus H. L.* Application of strip model to crack tip resistance and crack closure // *Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing*. – ASTM STP 536, 1973. – P. 5 – 21.
29. *Clark W. G.* Ultrasonic detection of fracture initiation and extension in WOL-type fracture toughness specimen // *Mater. Eval.* – 1976. – No. 8. – P. 185 – 190.
30. *Bouami D. and De Vadder D.* Fermature et ouverture de fissure de fatigue: detection et mesure par une methode ultrason // *Mater. et Tech.* – 1986. – 74, No. 3, 4. – P. 81 – 84.
31. *Irving P. E., Robinson J. L., and Beevers C. J.* A study of the effects of mechanical and environmental variables on fatigue crack closure // *Eng. Fract. Mech.* – 1975. – 7, No. 4. – P. 619 – 630.
32. *Clarke C. K. and Cassat G. C.* A study of fatigue crack closure using electric potential and compliance techniques // *Ibid.* – 1977. – 9, No. 3. – P. 675 – 688.

33. *Vosikovsky O.* Fatigue crack closure in an X70 steel // *Int. J. Fract.* – 1981. – **17**, No. 3. – P. 301 – 309.
34. *Маркочев В. М., Бобринский А. П., Кийко В. М.* Новый метод измерения длины трещины в токопроводящих образцах // *Завод. лаб.* – 1979. – № 9. – С. 861 – 862.
35. *Jablonski D. A. and Lee B. H.* Automated fatigue crack growth rate testing using a computerized test system // *Int. Conf. on Digital Techniques in Fatigue (SEECO'83)*. – London, 1983. – P. 291 – 308.
36. *Elber W.* The significance of fatigue crack closure // *Damage Tolerance in Aircraft Structures*. – ASTM STP 486, 1971. – P. 230 – 242.
37. *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.
38. *Roberts R. and Schmidt R. A.* Observations of crack closure // *Int. J. Fract. Mech.* – 1972. – **8**, No. 4. – P. 469 – 471.
39. *Gan D. and Weerman J.* Crack closure and crack propagation rates in 7050 aluminum // *Eng. Fract. Mech.* – 1981. – **15**, No. 1, 2. – P. 87 – 106.
40. *Liaw P. K., Leax T. R., Williams R. S., and Peck M. G.* Near-threshold fatigue crack growth behavior in copper // *Met. Trans.* – 1982. – **13A**, No. 9. – P. 1607 – 1618.
41. *Schmidt R. A. and Paris P. C.* Threshold for fatigue crack propagation and effects of load ratio and frequency // *Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing*. – ASTM STP 536, 1973. – P. 79 – 94.
42. *Endo K., Kamai K., and Matsuda Y.* Mechanical effects of corrosion products in corrosion // *Bull. JSME*. – 1981. – **24**, No. 194. – P. 1319 – 1325.
43. *Tsukuda H., Oglyama H., and Shiraishi T.* Fatigue crack growth and closure at high stress ratios // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 1995. – **18**, No. 4. – P. 503 – 514.
44. *Yisheng W. and Schijve J.* Fatigue crack closure measurement on 2024-T3 sheet specimens // *Ibid.* – No. 9. – P. 917 – 921.
45. *Hellmann D. and Schwalbe K. H.* Geometry and size effects on  $J - R$  and  $\delta - R$  curves under plane stress conditions // *Fracture Mechanics*. – ASTM STP 833, 1984. – P. 577 – 605.
46. *Clayton J. Q.* Crack closure and overload effects in fatigue // *Fracture Mechanics Technology Applications Materials Evaluation and Structures Design*. – Melbourne, 1983. – P. 491 – 503.
47. *Никифорчин Г. Н., Андрусив Б. Н., Вольдемаров А. В., Куцин М. А.* Оценка эффекта закрытия усталостных трещин // *Физ.-хим. механика материалов*. – 1982. – № 5. – С. 100 – 103.
48. *Троценко В. Т., Покровский В. В., Каплуненко В. Г.* Влияние размеров образцов на характеристики циклической трещиностойкости теплоустойчивых сталей // *Пробл. прочности*. – 1986. – № 4. – С. 3 – 9.

49. Пиняк І. С. Методологія вивчення закономірностей поширення втомної тріщини за критерієм росту – поточним і обмеженим ефективним розмахом КІН // Вибрації в техніці і технологіях. – 2001. – № 5. – С. 50 – 53.
50. А. с. 1670357 СССР МКИ<sup>5</sup> G01 В 5/30. Способ измерения раскрытия трещины на образце / Ю. А. Кашталян, И. С. Пиняк. – Опубл. 15.08.91, Бюл. № 30.
51. А. с. 1714427 СССР МКИ<sup>4</sup> G01 N 3/32. Установка для определения характеристик трещиностойкости материалов / И. С. Пиняк, А. В. Наумов, В. М. Морозов. – Опубл. 23.02.92, Бюл. № 7.
52. Пиняк И. С. Влияние закрытия трещины на определяемые характеристики циклической трещиностойкости сталей // Пробл. прочности. – 1998. – № 2. – С. 161 – 171.
53. А. с. 1635055 СССР МКИ<sup>4</sup> G01 N 3/32. Установка для испытаний образцов на циклическую трещиностойкость / И. С. Пиняк, О. Л. Малов. – Опубл. 15.03.91, Бюл. № 10.
54. Пиняк І. С. Вплив явища закриття вістря втомної тріщини на асиметрію циклу навантаження та пороги тріщиностійкості // Пробл. прочности. – 2000. – № 6 – С. 106 – 114.
55. Пиняк И. С. Текущее значение раскрытия вершины трещины усталости как экспериментально обоснованный критерий ее роста // Там же. – 1998. – № 1. – С. 25 – 33.
56. Троценко В. Т., Ясний П. В., Покровский В. В., Скоренко Ю. С. Методика и некоторые результаты исследования раскрытия трещины усталости // Там же. – 1987. – № 10. – С. 8 – 13.

Поступила 11. 07. 2000