

УДК 670.191.33

ОЦІНЮВАННЯ КІНЕТИКИ УТОМНОГО РУЙНУВАННЯ ШЛЯХОМ АВТОМАТИЗОВАНОГО АНАЛІЗУ ДЕФОРМАЦІЙНОГО РЕЛЬЄФУ НА ПОВЕРХНІ ЗРАЗКІВ З ЦЕНТРАЛЬНИМ ОТВОРОМ

П. О. МАРУЦАК¹, І. В. КОНОВАЛЕНКО¹, С. В. ПАНІН²,
П. С. ЛЮБУТІН², І. М. ДАНИЛЮК¹, М. А. ЖУРАВКОВ³

¹ Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя;

² Інститут фізики міцності і матеріалознавства Сибірського відділення РАН, Томськ;

³ Білоруський державний університет, Мінськ

Розвинуто метод оптично-цифрового аналізу дефектів за одночасного вимірювання кількох параметрів діагностування, оцінено дефектність матеріалу в околі концентратора напружень за переміщенням та спотворенням заздалегідь нанесених поверхневих міток. За результатами математичного опису поля переміщень на поверхні металу запропоновано інформативні ознаки кількісного аналізу параметрів пошкодженості.

Ключові слова: *деградація, пошкодженість, діагностування, оптично-цифровий контроль.*

Оптично-цифровий аналіз – один із найефективніших методів неруйнівного контролю для визначення дефектів різних типів, зокрема корозійних, втомних тощо [1]. Його широко застосовують у виробництві, для діагностування елементів конструкцій, руйнування яких спричиняє важкі техногенні наслідки [2]. Одним із напрямків розвитку таких підходів є оцінювання параметрів деформаційного рельєфу на поверхні металів. Існує тісний зв'язок між поверхневими та глибинними шарами матеріалу [3]. Тому за станом поверхні можна судити про накопичені втомні пошкодження, що і використовують для оцінювання втомного пошкодження конструкційних елементів, виготовлення зразків-свідків, сенсорів втоми, або т.зв. “давачів деформацій інтегрального типу” [1, 4].

Отже, актуально створити методи оптично-цифрового контролю пошкодженості конструктивних елементів з утомними тріщинами за параметрами деформаційного рельєфу поверхні [5]. В основі таких підходів – висока вірогідність виникнення локальних пошкод в околі концентраторів напружень і використання їх як інформативних ознак для прогнозування кінетики поширення втомних тріщин [6]. Параметри деформаційного рельєфу застосовують як характеристики матеріалу, які еволюціонують внаслідок циклічного навантажування і віддзеркалюють локалізацію деформаційних процесів [7]. Алгоритми їх оцінювання дають змогу вимірювати та обчислювати кількісні характеристики цифрових зображень, виконувати над ними математичні та логічні операції. Але через випадковість деформаційного відгуку матеріалу на силовий вплив необхідно допрацювати відомі та розвинути нові підходи оптично-цифрового контролю [4, 5].

Нижче створено і використано алгоритм оптично-цифрового підходу для аналізу втомних пошкоджень в околі колоподібного концентратора напружень.

Методика. Досліджували фрагмент газопроводу “Київ–Захід України-1” (КЗУ-1) зі сталі 17Г1С діаметром 1020 mm, товщиною стінки 10 mm після сорока

років експлуатації в землі. Використовували поздовжні призматичні зразки $10,0 \times 1,0 \times 100$ mm з центральним концентратором діаметром 2,4 mm, які навантажували циклічним розтягом за розмаху напружень $\Delta\sigma = 250$ МПа на сервогідравлічній установці Biss UTM 150 за частоти 10 Hz та асиметрії циклу навантажування $R = 0,1$. Поверхню зразка в околі концентратора впродовж утомних випробувань фотографували фотоапаратом Canon D550, використовуючи оптичний мікроскоп МБС-10.

Загальну циклічну довговічність зразка ($N = 1,43 \cdot 10^6$ cycles) умовно ділили на два етапи діагностування: попереднього циклічного деформування, впродовж якого на поверхні зразка не виявляли структурно-механічних та оптично-цифрових змін ($N_1 = 1,03 \cdot 10^6$ cycles); ідентифікації втомної тріщини та дефектометричного контролю шляхом фіксування зміни стану поверхні, зародження та росту втомної тріщини ($N_2 = 4 \cdot 10^4$ cycles).

Наведені дані торкаються саме другого етапу контролю. Під час шліфування на поверхню зразка наносили поздовжньо орієнтовану систему міток, за зміною геометрії та орієнтації яких контролювали зсувні процеси в околі концентратора напружень на етапі інкубаційного втомного пошкодження та під час поширення короткої тріщини.

Метод оцінювання орієнтації поверхневих міток. Відомі підходи оцінювання взаємозв'язку між деформуванням та руйнуванням [1, 3, 5] базуються на тому, що певне співвідношення параметрів зовнішнього навантажування (напруження, гранична деформація тощо) визначає макроскопічну втрату тривкості внаслідок течіння; кожному етапу деформування властиві пластичні зсувні та ротаційні зміщення; за статистичними параметрами полів деформацій можна описати масштабні-інваріантні закономірності самоорганізації деформаційного процесу [8].

Вхідною інформацією для математичного оброблення є оптично-цифрове зображення впорядкованого рельєфу поверхні з лінійними мітками. Оскільки матеріал циклічно деформується внаслідок зсувів або ротацій, то циклічне напруцювання змінюватиме нахил міток, або спотворюватиме їх геометрію. В околі концентратора умовно виділили чотири інформативні ділянки, на яких аналізували зміну орієнтації міток під час циклічного навантажування (рис. 1a).

Кінетику руйнування матеріалу оцінювали за значенням кута розкриття вершини тріщини (СТОА), який є одним з деформаційних параметрів механіки руйнування (рис. 1b). Кожну зону (рис. 1a) аналізували у п'яти точках, використавши інвертування та бінарне перетворення зображення з визначенням переважального кута нахилу прямолінійних міток за допомогою перетворення Хафа.

Вхідним для аналізу було цифрове зображення поверхні зразка з поздовжніми прямолінійними мітками в градаціях сірого кольору $I_0(x, y)$, де x – індекс стовпчика, $x = \overline{1, m}$; y – індекс рядка зображення, $y = \overline{1, n}$; $I_0(x, y) = \overline{0, 255}$.

Після інвертування початкового зображення отримали зображення $\overline{I_0}$, кожен елемент якого $\overline{I_0}(x, y) = 255 - I_0(x, y)$. Для виявлення поверхневих міток його сегментували шляхом бінарного перетворення. В результаті одержали монохромне зображення $I_B(x, y)$ з яскравістю кожної точки

$$I_B(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{при } \overline{I_0}(x, y) > B, \\ 0 & \text{при } \overline{I_0}(x, y) \leq B, \end{cases} \quad (1)$$

де B – граничне бінарне перетворення, яке вибирали з аналізу гістограми зображення з умови $B = B_{med} - 2\sigma$, де B_{med} – середня яскравість на гістограмі; σ – середньоквадратичне відхилення її розподілу.

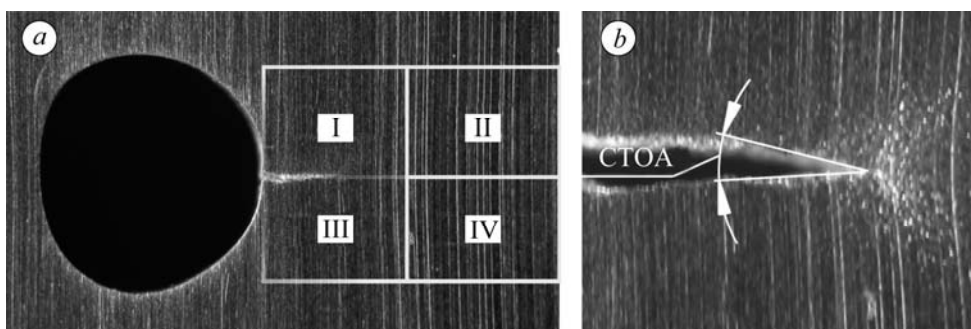


Рис. 1. Ділянки (I–IV) на зразку зі штучними поверхневими мітками (a) та ілюстрація вимірювання СТОА (b).

Fig. 1. Zones (I–IV) on the specimen with artificial surface marks (a) and illustrations for crack tip opening angle (CTOA) measuring (b).

Зафіксували початкові (рис. 2a–f) та монохромні (рис. 2g–j) зображення штучних міток на поверхні зразка у межах зони II. Виявили зростання відхилення міток від осі зразка через напруження.

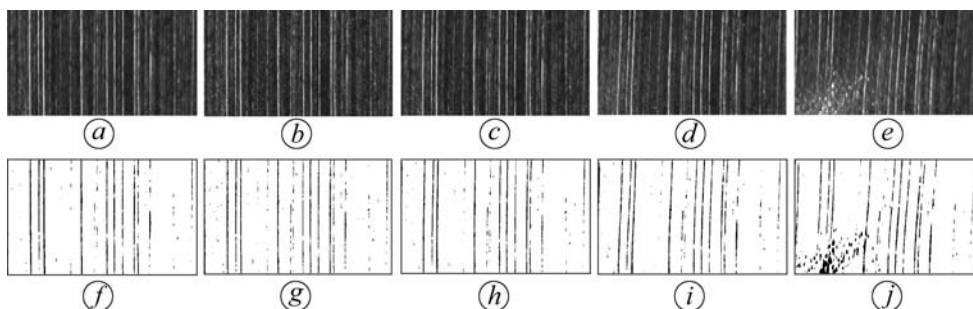


Рис. 2. Цифрові фото поверхні в зоні II з поверхневими мітками в точках оптично-цифрового контролю (a–e) та їх монохромне подання (f–j).

Fig. 2. Digital photos of specimen surface in the zone II with artificial surface marks at points of opto-digital control (a–e) and their monochrome representation (f–j).

Для обчислення переважального кута нахилу міток до монохромних зображень I_B застосовували перетворення Хафа, відображаючи їх на параметричний простір прямих [9]. Нехай сімейство прямих на площині задане параметричним рівнянням

$$h(\theta, \rho, x, y) = x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta - \rho, \quad (2)$$

де (x, y) – параметричний простір зображення; (θ, ρ) – параметричний простір сімейства прямих на зображенні (θ, ρ – компоненти нормального рівняння прямої).

У перетворенні Хафа обчислювали матрицю акумуляторів S у просторі параметрів (θ, ρ) з дискретністю $\Delta\theta, \Delta\rho$ (на практиці під час аналізу зображень приймали $\Delta\theta = 0,5^\circ; \Delta\rho = 1$ pixel). Величини $\Delta\theta$ та $\Delta\rho$ впливають на точність визначення параметрів θ та ρ у рівнянні (2). Попереднім аналізом зображень виявили, що розкид нахилів різних прямолінійних фрагментів становить біля 4° . Таким чином, вибраний крок $0,5^\circ$ дає можливість розпізнати зміну нахилу такого фрагмента.

Кожній комірці фазового простору відповідає акумулятор з певною кількістю інформативних точок на зображенні. Приймали таку умову належності точки $I_B(x, y)$ зображення I до прямої h , заданої коміркою параметричного простору $S(\theta, \rho)$:

$$r(x, y, \theta, \rho) = \begin{cases} 1 & \text{при } d(I_B(x, y), h(\theta, \rho, x, y)) \leq d_{\text{lim}} , \\ 0 & \text{в іншому випадку ,} \end{cases} \quad (3)$$

де $d(I_B(x, y), h(\theta, \rho, x, y))$ – відстань від точки (x, y) до прямої $h(\theta, \rho, x, y)$; d_{lim} – граничне значення, яке для розглянутих зображень дорівнює 4 pixel.

Таким чином, функція перетворення Хафа

$$H(S(\theta, \rho)) = \sum r(x, y, \theta, \rho) . \quad (4)$$

Кількісним аналізом акумуляторів у параметричному просторі виявили на зображенні прямі з найбільшою кількістю інформативних точок. Зони, в яких функція $H(S(\theta, \rho))$ досягає максимуму, відповідають найвиразнішим прямим. Значення параметра $\theta = \theta_{\text{base}}$ характеризуватиме переважальний напрямок переміщення інформативних точок (елементів деформаційного рельєфу). Вигляд функції $H(S(\theta, \rho))$ для зображень на рис. 2*g, i, j* ілюструє рис. 3. Зони максимальних її значень (найсвітліші) відповідають тим комбінаціям параметрів (θ, ρ) , які формують пряму, що проходить через найбільшу кількість точок зображення. Найсвітлішими вважали ті зони, де яскравість пікселя становила 250...255 (за максимального значення 255). Наявність кількох невеликих пікових зон (рис. 3*a*) означає, що зображення містить кілька добре виражених прямих. Розмивання зон високих значень функції $H(S(\theta, \rho))$ вказує на те, що прямі лінії на зображенні не такі виразні, а їх зміщення вздовж осі θ відповідає зміні кута нахилу прямих.

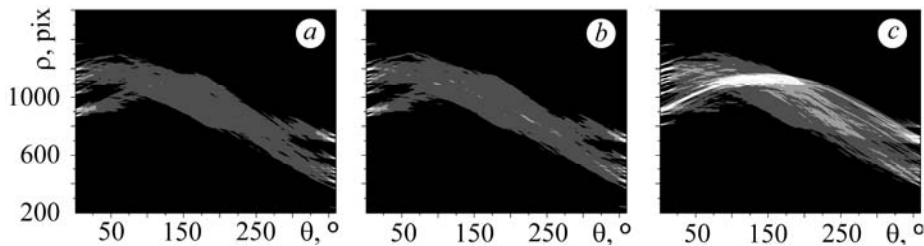


Рис. 3. Вигляд функції перетворення Хафа для зображень на рис. 2*f, h, j*.

Fig. 3. View of a function of Hough transform for images (see Fig. 2*f, h, j*).

З одержаних результатів дійшли до таких висновків:

- зміна орієнтації міток чутлива до накопичення пошкоджень на поверхні зразка, проте вони мають індивідуальні особливості у кожній з аналізованих ділянок;
- індивідуальні особливості зміни кожної маркерної смуги визначають локалізацію деформації в аналізовані ділянки і запропонований алгоритм;
- маркерні смуги можуть слугувати для аналізу стадійності розвитку пошкоджуваності оцінюваної поверхні (рис. 4).

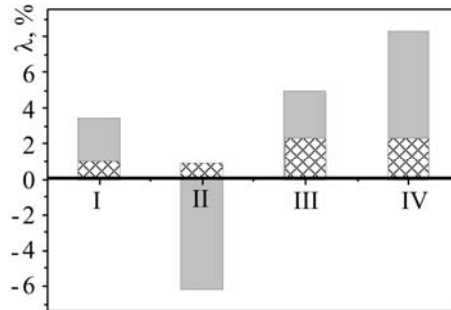
Через високу міцність матеріалу деформаційний процес локалізується, а також розвиваються смуги локального пластичного деформування. При цьому зміна орієнтації смуг-маркерів синергетична і є відгуком на зсуви та ротаційне обертання конгломератів зерен сталі [8].

Методика оцінювання геометричних параметрів отвору. Запропонований [10] алгоритм аналізу формозміни пітингів шляхом їх підростання та об'єднання використали для оцінювання стану пластини із коловим отвором під час циклічного напруження. Міру наближення форми отвору до колової розраховували за коефіцієнтом округлості [10]. Щоб виявити ступінь його спотворення під час підростання тріщини, розраховували координати його центра мас $C_i(x_{ci}, y_{ci})$ (рис. 5):

$$x_{ci} = \frac{\sum_{m=1}^{f_i} x_m}{f_i}, \quad y_{ci} = \frac{\sum_{m=1}^{f_i} y_m}{f_i}. \quad (5)$$

Рис. 4. Зміна нахилу смуг-маркерів на поверхні зразка зі сталі 17Г1С: $\lambda_\varphi = [(\alpha_0 - \alpha_{deg}) / \alpha_0] \cdot 100\%$, де $\alpha_0 = 90^\circ$ у зонах контролю I–IV після 10^3 (заштриховані) та 10^4 (сірі стовпчики) циклів напруцювання.

Fig. 4. Change of slope of the lines-marks on the surface of specimen of the 17Г1С steel: $\lambda_\varphi = [(\alpha_0 - \alpha_{deg}) / \alpha_0] \cdot 100\%$, where $\alpha_0 = 90^\circ$ in the areas of control I–IV after 10^3 (dashed) and 10^4 (grey columns) operated cycles.



Далі обчислювали коефіцієнт округлості K_{ci} – відсоток потрапляння пікселів в межах об'єкта у коло з діаметром D_i , центр якого суміщено з центром мас C_i [10]:

$$K_c = \frac{\sum_{m=1}^{f_i} g(\vec{r}_m, D_i)}{f_i} \cdot 100\%, \quad g(\vec{r}_m, D_i) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } |\vec{r}_m| \leq D_i / 2, \\ 0, & \text{якщо } |\vec{r}_m| > D_i / 2, \end{cases} \quad (6)$$

де $g(\vec{r}_m, D_i)$ – індикаторна функція, яка показує, чи потрапляє m -ий піксель отвору всередину еквівалентного кола діаметром D_i ; \vec{r}_m – радіус-вектор від центра еквівалентного кола $C_i(x_{ci}, y_{ci})$ до m -го пікселя об'єкта з координатами (x_m, y_m) .

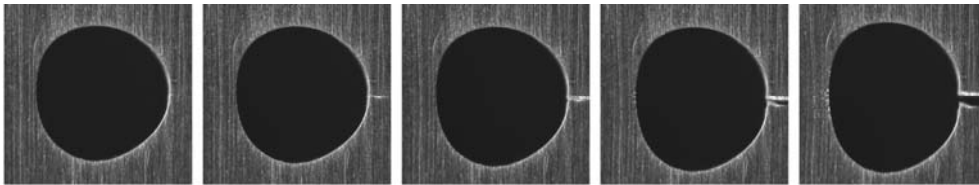


Рис. 5. Цифрові зображення отвору для різних точок оптично-цифрового контролю зразка зі сталі 17Г1С за напруцювання $N = 0; 12000; 26000; 36000; 40000$ cycles відповідно.

Fig. 5. Digital images of the hole for different points of opto-digital control of 17Г1С steel specimens after $N = 0; 12000; 26000; 36000; 40000$ cycles, respectively.

Вважали, що зміна коефіцієнта округлості K_c свідчить про локалізацію деформування на макрорівні внаслідок підростання втомної тріщини (рис. 6a). До вхідних зображень застосовували бінарне перетворення (1) і аналізували найбільший зі знайдених зв'язний елемент: обчислювали його площу (за кількістю пікселів) та координати центра мас. За цією площею знаходили еквівалентний діаметр D_i кола еквівалентної площі.

Коефіцієнт K_c набуває значень від 1 до 100% і вказує на кількість пікселів, що потрапляє всередину кола, центр якого розташований у центрі мас реального колого концентратора з еквівалентним діаметром під час циклічного напруцювання (рис. 6b). Виявили, що діаметр D_i змінюється від 2,42 у ненавантаженому зразку до 2,57 mm для останньої точки оптично-цифрового контролю рис. 6b. Значення K_c при цьому спадає від 98,25 до 94,9%. Встановлено, що зі збільшенням швидкості підростання дефекту інтенсифікується пластичне деформування в околі отвору.

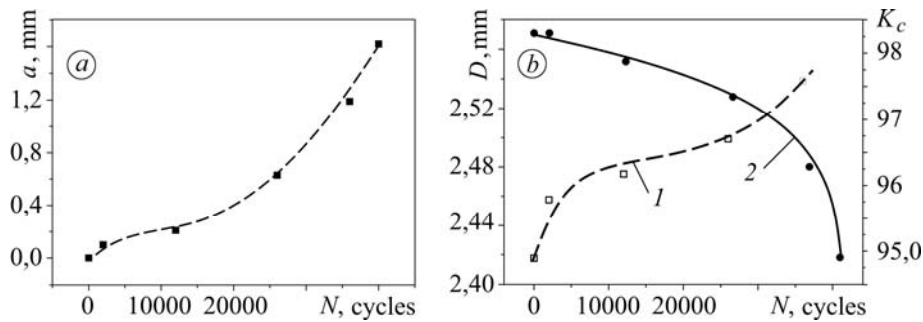


Рис. 6. Кінетика поширення тріщини в пластині з отвором зі сталі 17Г1С (а) та зміна діаметра кола еквівалентної площі D_i (крива 1) та коефіцієнт округлості отвору K_c (крива 2) залежно від кількості циклів напруцювання N (b).

Fig. 6. Kinetics of the crack growth in the 17Г1С steel plate with a hole (a) and change of the hole diameter with equivalent area D_i (curve 1) and ratio of hole circularity (curve 2) versus numbers of loading cycles N (b).

Деформаційні підходи до оцінки руйнування матеріалу. СТОА дає можливість описати тріщиностійкість матеріалу за циклічного навантаження (рис 7a). На відміну від інших параметрів лінійної та нелінійної механіки СТОА можна визначити за результатами прямого вимірювання, без додаткових перерахунків. Вважали, що кут ψ_c є константою матеріалу, хоча виявилось, що він залежить від довжини тріщини (рис. 7b; [11]).

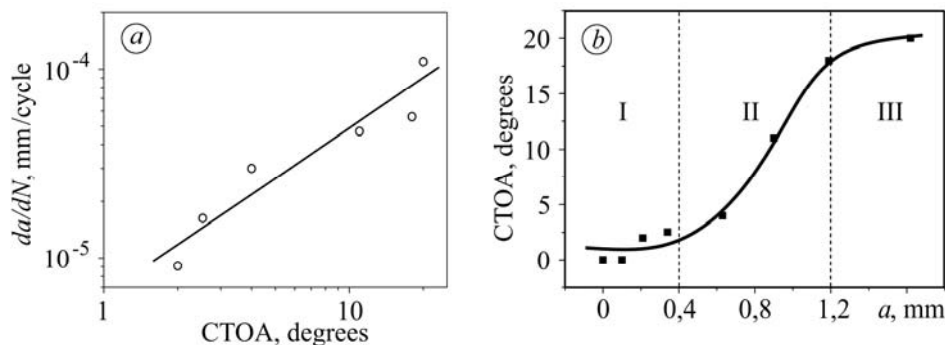


Рис. 7. Залежність швидкості росту тріщини da/dN від СТОА (а) та вплив довжини тріщини на СТОА (b).

Fig. 7. Dependence of crack growth rate da/dN on CTOA (a) and effect of crack length on the CTOA (b).

Проаналізовано кути розкриття тріщини залежно від її довжини (рис. 7b). Для “фізично короткої тріщини” кут розкриття становив 2° . Граничне значення кута відповідає суттєвому підростанню тріщини, яке передуює долому зразка (СТОА $\sim 20^\circ$).

Поведінка матеріалу під час деформування. Закономірності зміни СТОА залежно від довжини тріщини можна поділити на три ділянки (рис. 7b), які пов’язані з різними масштабними рівнями деформування [11, 12].

Мікрорівень. На ділянці I значення СТОА невисоке, оскільки робочий переріз зразка має ще достатній запас стримуальної здатності і матеріал активно опирається деформуванню і руйнуванню [13, 14]. Подальша зміна кута нахилу залежності a –СТОА відтворює не лише вплив початкової дефектності, але і зни-

ження його опірності зсуву під час навантажування. Локалізація деформації навантаженого зразка проявляється перегином на цій кривій.

Мезорівень. Ділянка II характеризується максимальним зростанням СТОА та чергуванням процесів деформування і руйнування матеріалу. Спостерігали перерозподіл розкриття тріщин і розвиток релаксаційних процесів у металі. В межах цієї залежності свідчить, що структурна адаптація матеріалу відбувається через зсув прилеглих ділянок металу в околі вершини тріщини [15].

Макрорівень. Ділянка III описує деформування матеріалу до точки втрати зсувної макротривкості. При цьому зсувні деформації спричиняють релаксацію в околі концентраторів напружень, зокрема у вершині втомної тріщини. Це пов'язано із вичерпуванням запасу пластичності матеріалу [16, 17]. Запропоновано для цього використовувати комплекс показників деградації матеріалу, які дають змогу виявити її на мікро-, мезо- та макрорівнях [8].

Оцінювання деградації сталі

Параметри	Структурні рівні деградації матеріалу		
	мікро-	мезо-	макро-
Кут орієнтації поверхневого рельєфу	+	+	+
Площа макродефекту	-	+	+
Еквівалентний діаметр макродефекту	-	+	+
Кут розкриття вершини тріщини	-	-	-

Апробований підхід перспективний для аналізу пошкодженості в околі коллоїдних концентраторів напружень. У поєднанні із параметрами нелінійної механіки руйнування він дає змогу оцінити тріщинотривкість, залишкову довговічність матеріалів, поглибити інформативність фрактодіагностування [18].

ВИСНОВКИ

Запропоновано підхід багатопараметрового оптично-цифрового діагностування дефектності матеріалів, сформульовано низку вимог щодо його інформативності й кількісного опису. Визначено і фізично обґрунтовано способи вибіркового оптично-цифрового аналізу дефектності матеріалів, зокрема за одночасного вимірювання кількох інформативних параметрів діагностування. Це дасть можливість аналізувати стан матеріалу на різних структурно-масштабних рівнях. Розроблені на цій основі підходи та алгоритмічне забезпечення неруйнівного контролю металу достатньо чутливі для діагностування втомних пошкоджень.

РЕЗЮМЕ. Развѣт метод оптико-цифрового анализа дефектов при одновременном измерении нескольких диагностических параметров, оценена дефектность материала возле концентратора напряжений по перемещениям и искажениям предварительно нанесенных поверхностных меток. На основе результатов математического описания поля перемещений на поверхности металла предложены информативные признаки количественного анализа параметров поврежденности.

SUMMARY. The approaches to quantitative analysis of damages of the local zones on the sample surface using the methods of optical digital analysis of defects in materials, including the simultaneous measurement of several diagnostic parameters were developed. It helps to evaluate the state of the material at different structural scales. The approach to optical digital control of the material defects, based on mathematically correct accounting of the interaction of deformation field with a pre-applied artificial sensory is proposed. Using the results of the mathematical description of the displacement field on the steel surface the informative features for the quantitative analysis of the damage parameters are proposed.

1. *Сызранцев В. Н., Голофаст С. Л.* Измерение циклических деформаций и прогнозирование долговечности деталей по показаниям датчиков деформаций интегрального типа. – Новосибирск: Наука, 2004. – 206 с.
2. *Марголин А. М., Сызранцев В. Н., Кузяков О. Н.* Применение датчиков деформации интегрального типа для оценки усталостных изменений оборудования // Изв. вузов. Нефть и газ. – 2008. – № 6. – С. 51–58.
3. *Змызгова Т. Р.* Экспериментальная методика регистрирования и оценки накопленного усталостного повреждения в материале нефтегазового трубопроводного оборудования с помощью датчиков деформации интегрального типа // Нефть и газ. – 2012. – № 7. С. 14–16.
4. *Fatigue damage and sensor development for aircraft structural health monitoring / S. R. Ignatovich, A. Menou, M. V. Karuskevich, and P. O. Maruschak // Theoret. and Appl. Fract. Mech. – 2013. – 65. – P. 23–27.*
5. *Патент України № 40742.* Спосіб визначення місця розташування та форми концентратора напружень / П. О. Марущак, І. В. Коноваленко. – Опубл. 27.04.2009; Бюл. № 8.
6. *Марущак П. О., Коноваленко І. В.* Вимірювання неоднорідних полів переміщень поверхні матеріалу та розкриття вершини тріщини за аналізом цифрових зображень // машинознавство. – 2008. – № 12. – С. 18–21.
7. *A novel algorithm for damage analysis of fatigue sensor by surface deformation relief parameters / I. Konovalenko, P. Maruschak, A. Menou et al. // Proc. Int. Symp. “Operational research and applications” (May 8–10). – Morocco: Marrakech, 2013. – P. 678–684.*
8. *Panin V. E., Elskova T. F., and Popkova Yu. F.* Stages of multiscale fatigue cracking as a nonlinear rotational autowave process // Physical Mesomechanics. – 2011. – 14. – P. 112–123.
9. *Duda R. O. and Hart P. E.* Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures // Artificial Intelligence Center, Comm. ACM. – 1972. – 15, № 1. – P. 11–15.
10. *Effect of long term operation on degradation of material of main gas pipelines / P. Maruschak, R. Bishchak, I. Konovalenko et al. // Mat. Sci. Forum. – 2014. – 782. – P. 279–283.*
11. *Crack tip opening angle optical measurement methods in five pipeline steels / Ph. P. Darcis, C. N. McCowan, H. Windhoff et al. // Engng. Fract. Mech. – 2008. – 75. – P. 2453–2468.*
12. *Hashemi S. H., Dastani H., and Sadri J. A* new data analysis technique to examine crack tip opening angle values tested in API X65 pipe steel // Fatig. & Fract. of Engng. Mater. & Struct. – 2013. – 36. – P. 614–622.
13. *Патент України № 38957.* Спосіб визначення розкриття вершини тріщини / П. В. Ясний, П. О. Марущак, Ю. І. Пиндус та ін. – Опубл. 26.01.2009; Бюл. № 1.
14. *Взаємозв'язь фрактальної розмірності і мезомеханізмів пластического деформування матеріала в вершині усталостної тріщини / П. В. Ясний, П. О. Марущак, С. В. Паннин, П. С. Любутин // Обработка материалов давлением. – 2010. – № 1(22). – С. 200–204.*
15. *Kunz L., Lukaš P., and Navratilova L.* Strain localization and fatigue crack initiation in ultrafine-grained copper in high- and giga-cycle region // Int. J. of Fatigue. – 2014. – 58. – P. 202–208.
16. *Стадійність деформування матеріала і кінетика росту усталостної тріщини в сталі 25Х1М1Ф при низьких частотах навантаження / П. В. Ясний, П. О. Марущак, С. В. Паннин і др. // Фіз. мезомеханіка. – 2012. – 15, № 2. – С. 97–107.*
17. *Марущак П.О.* Циклічна тріщиностійкість біматеріалу 15Х13МФл/25Х1М1Фл // Зб. пр. Міжнар. наук.-техн. конф. “Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин” (4–7 жовтня). – Тернопіль: ТНТУ, 2004. – С. 249–253.
18. *Комп'ютерний аналіз характерних елементів фрактографічних зображень / Р. Я. Косаревич, О. З. Студент, Л. М. Свірська та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – 48, № 4. – С. 53–60.*
(*Kosarevych R. Ya., Student O. Z., Svirs'ka L. M., Rusyn B. P., and Nykyforchyn H. M.* Computer analysis of characteristic elements of fractographic images // Materials Science. – 2013. – 48, № 4. – P. 474–481.)

Одержано 16.12.2013