

УДК 670.191.33

АВТОМАТИЗОВАНИЙ АНАЛІЗ МНОЖИННОГО РОЗТРІСКУВАННЯ НАНОПОКРИВУ ЗА ІНТЕГРАЛЬНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

І. В. КОНОВАЛЕНКО, П. О. МАРУЩАК

Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя

Ідентифіковано та кількісно проаналізовано мережі тріщин у цирконієвому нанопокриві на основі оброблення цифрових зображень. Поведінку дефектів оцінено за результатами діагностування окремих етапів деформаційного процесу. Встановлено, що окремим стадіям руйнування покриву відповідають свої інтегральні параметри зображення. На основі послідовної обробки даних поверхневого множинного розтріскування виявлено основні закономірності коалесценції окремих дефектів та фрагментації покриву. Встановлено, що множинні дефекти в матеріалі частково збільшують його деформаційні властивості, спричиняючи “поглинання” енергії пружно-пластичних деформацій прилеглих ділянок. Подано теоретичні передумови і експериментальні результати.

Ключові слова: *множинне розтріскування, аналіз зображення, ідентифікація тріщин, діагностування.*

Множинні дефекти – один з найпоширеніших видів пошкодження матеріалів та конструкцій. Їх ідентифікація та кількісний опис дають змогу прогнозувати технічний стан системи з урахуванням тріщиноподібних дефектів [1, 2]. На сьогодні відомо низка підходів для оцінювання напружено-деформованого стану матеріалів з сіткою тріщиноподібних дефектів із урахуванням їх форми та просторового розташування [3, 4]. Проте, щоб описати взаємовплив дефектів та виявити результати їх взаємодій під час деформування необхідні подальші дослідження [5].

Підходи фізичної мезомеханіки дали змогу розглянути деформаційні процеси на кількох структурно-ієрархічних рівнях, що достовірніше відображає будову реальних фізико-механічних систем [6, 7]. Тобто застосування фізичних закономірностей є підґрунтям структурного підходу, визначальною особливістю якого є стадійність деформування з урахуванням зовнішніх та внутрішніх структурних параметрів матеріалу [8, 9]. Проте для матеріалів з множинними тріщиноподібними дефектами використання цих підходів вимагає додаткового методичного доопрацювання. Сучасні підходи до аналізу цілісності покривів ґрунтуються переважно на морфологічних особливостях множинних дефектів [9, 10]. При цьому основною методичною перевагою є автоматичний опис та ідентифікація. Наслідком цього є впорядкований масив даних про структурні складові або дефекти матеріалу [11, 12]. Системність вказаного підходу полягає у спробі аналізу за двома структуроутворювальними ознаками – розмірами структурних елементів і їх просторовою орієнтацією.

Узагальнюючи опис деформаційних процесів у покриві, можна відзначити такі закономірності [2, 13, 14]: зародження та активація тріщиноподібних розломів відбувається за перевищення локальними напруженнями номінальних напружень у матеріалі; старт тріщини в системі з кількома дефектами можливий за умови локалізації деформацій у районі дефекту з найбільш енергетично вигідною орієнтацією.

Контактна особа: П. О. МАРУЩАК, e-mail: maruschak.tu.edu@gmail.com

Мета роботи – оцінити закономірності множинного розтріскування цирконієвого покриття під час квазістатичного деформування, використовуючи методи обробки зображень.

Метод нанесення покриття. Іонне наноструктурування поверхневого шару зразків з сталі 25X1M1Ф проводили за допомогою вакуумно-дугового джерела металевих іонів на установці УВН-0,2 “Квант” [15]. Зразки обробляли за умови досягнення вакууму в камері $3 \cdot 10^{-3}$ Па потоком іонів цирконія з енергією 0,9... 2,8 keV та густиною іонного струму 0,1...0,3 mA/sm². Тривалість обробки від 5 до 20 min. Тримач зі зразками закріплювали безпосередньо на предметному столику, що входив до схеми прискорення іонів. Іони прискорювались у динамічному самоорганізованому приповерхневому просторі, який є подвійним електричним шаром, сформованим навколо поверхні зразка з від’ємним потенціалом [16]. Зразки досліджували на малоциклову втому на випробувальній машині СТМ-100 за таких параметрів навантажування: частота $f = 1,0$ Hz, $\sigma_{\max} = 500$ МПа, $\sigma_{\min} = 0,1\sigma_{\max}$. Досягнувши певного циклічного напруження, зразки знімали з випробувальної машини та досліджували поверхню за допомогою сканівного мікроскопа РЕМ-106И.

Класифікація виду поверхні розтріскування. Виділяють декілька етапів множинного розтріскування, а саме: *розпорошене розтріскування*, яке виникає в результаті зародження відокремлених поперечних та поздовжніх тріщин; *об’єднання тріщин* з утворенням мережі внаслідок перетину окремих дефектів; *блочне розтріскування*, що виникає внаслідок коалесценції низки об’єднаних тріщин, утворюючи повністю відокремлені блоки матеріалу, обмежені розвинутою мережею дефектів, які формують великі замкнуті контури прямокутної форми. Алігаторські тріщини – це мережа об’єднаних тріщин, що мають спільні точки перетину та формують мережу багатокутників [9]. Схематизацію тріщин за їх напрямом та загальним малюнком ілюструє рис. 1.

Щоб автоматизувати класифікацію тріщин, використали метод аналізу зображень. Вихідне багатоградцієне фотозображення дослідного зразка обробляють відповідно до алгоритму пошуку та розпізнавання пошкоджених фрагментів. В результаті отримано бінарне зображення з локалізованими ділянками тріщин. Після цього його аналізують відповідно до методики інтегральної оцінки поверхні та класифікації тріщин.

Алгоритм ідентифікації положення тріщин на поверхні нанопокриття. Щоб ідентифікувати тріщини на фотозображенні дослідного зразка, використали алгоритм, що містить операції нормалізації зображення, фільтрування, бінаризації, скелетизації та визначення положення тріщин [17]. Вихідним для аналізу є сіре багатоградцієне зображення досліджуваного зразка G , отримане на виході цифрової камери.

Нормалізація зображення є підготовчою операцією, що полягає у вирівнюванні освітленості і дає змогу зменшити вплив нерівномірності освітлення досліджуваної зони нанопокриття на подальшу роботу алгоритму. Ця операція має два етапи: формування загальної картини освітленості шляхом низькочастотного фільтрування та видалення з початкового зображення низькочастотної складової.

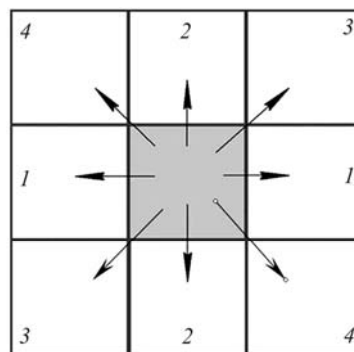


Рис. 1. Схема визначення напрямків поширення тріщини [9]: поздовжні (1), поперечні (2), блочні (1 та 2) і алігаторські (3 та 4) тріщини.

Fig. 1. The procedure for determining directions of crack propagation [9]: longitudinal (1), transverse (2); block (1 and 2) and alligator (3 and 4) cracks.

Бінарне перетворення – первинна базова операція виявлення частин зображення, що належать тріщинам, і виокремлення їх від фону. Перетворюють шляхом порівняння яскравості кожної точки зображення з певним граничним значенням. Використано адаптивний метод бінаризації, за якого границю перетворення обчислюють окремо для кожного фрагмента зображення. Такий підхід дає можливість зменшити вплив завад на розпізнавання зображення [18].

Проте складна геометрія тріщин зумовлює дискретний характер отриманого бінарного зображення, яке містить значну кількість фрагментів однієї і тієї ж тріщини. Щоб усунути із зображення малі шумові елементи та підсилити на ньому головні тріщини, вихідне зображення фільтрують дискретним гауссовим фільтром [19]. Фільтрування “розмиває” межі об’єктів бінарного зображення, в результаті чого близькі об’єкти об’єднуються, формуючи одну неперервну тріщину. Повторна бінаризація дає змогу на основі відфільтрованого багатоградісного зображення сформувати масив точок, які описують положення тріщини й приймаються для подальшого розгляду. Отримане на цьому етапі зображення І містить загальну картину розтріскування і може бути використане для отримання інтегральних показників, які характеризують стан наповокриву [2, 19].

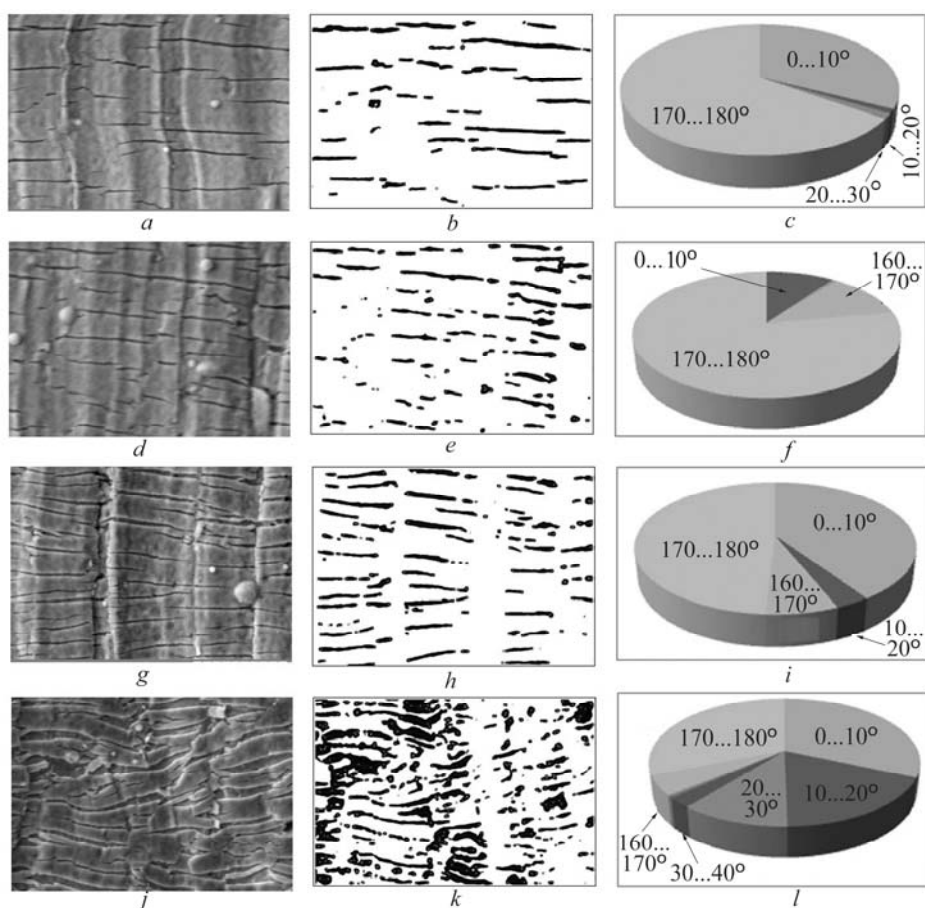


Рис. 2. Вихідне зображення деформованої поверхні (*a, d, g, j*), результати обробки та ідентифікації тріщиноподібних дефектів (*b, e, h, k*) і діаграми розподілу кутів нахилу тріщин (*c, f, i, l*) за відносної деформації $\varepsilon = 5,9\%$ (*a-c*); $7,8\%$ (*d-f*); $15,3\%$ (*g-i*); $45,4\%$ (*j-l*).

Fig. 2. The original image of deformed surface (*a, d, g, j*), results of processing and identification of crack-like defects (*b, e, h, k*) and curves of crack inclination angles distribution (*c, f, i, l*) under relative deformation $\varepsilon = 5,9\%$ (*a-c*); $7,8\%$ (*d-f*); $15,3\%$ (*g-i*); $45,4\%$ (*j-l*).

Подальші етапи обробки зображення дають можливість визначити кількість тріщин, їх положення, напрям та розмір [7, 8]. Зображення пошкодженої поверхні одержували за різних деформацій, після чого їх аналізували згідно з описаним алгоритмом. Показано (рис. 2) отримані за допомогою мікроскопа вихідні багатоградаційні фотографії поверхні, розпізнані зони локалізації тріщин як результат їх ідентифікації та діаграми розподілу кутів нахилу тріщин.

Методика інтегрального оцінювання стану поверхні та класифікації тріщин. Вихідною інформацією для аналізу розтріскування є розпізнане зображення I пошкодженої тріщинами аналізованої поверхні, на якому нульові пікселі відповідають фону, а ненульові – тріщинам. За результатами обробки зображення одержали два види гістограм: вертикальну V_h та горизонтальну H_h [10]:

$$V_h(j) = \sum_{i=1}^n I(i, j), \quad (1)$$

$$H_h(i) = \sum_{j=1}^m I(i, j), \quad (2)$$

де j – індекс стовпця, $j \in (1, \dots, m)$; i – індекс рядка зображення, $i \in (1, \dots, n)$.

Кожен елемент вертикальної та горизонтальної гістограм містить ненульові пікселі відповідно у стовпчиках та рядках аналізованого зображення. Гістограми для дослідного зразка за деформації $\epsilon = 5,9\%$ (рис. 2а) наведено на рис. 3.

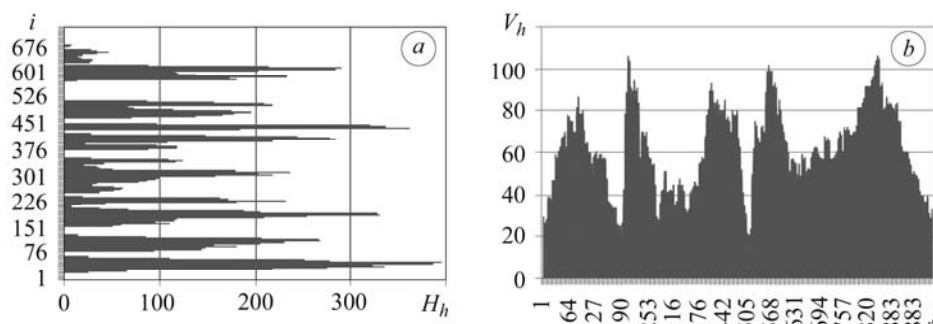


Рис. 3. Горизонтальна (а) та вертикальна (b) гістограми для зображення деформованої поверхні на рис. 2а.

Fig. 3. Horizontal (a) and vertical (b) histograms for representation of the deformed surface in Fig. 2a.

Гістограми (1), (2) є вихідним базовим масивом даних, на основі якого оцінювали ступінь розтріскування аналізованої поверхні вздовж координатних осей та визначали ділянки зображення, що відповідають пошкодженим фрагментам поверхні.

Для кожної з гістограм розраховували середні значення [10]:

$$\mu_v = \left(\sum_{j=1}^m V_h(j) \right) / m, \quad (3)$$

$$\mu_h = \left(\sum_{i=1}^n H_h(i) \right) / n. \quad (4)$$

Параметри μ_v та μ_h містять усереднену кількість ненульових пікселів у вертикальній та горизонтальній гістограмах, відповідно. Таким чином, коефіцієнти μ_v та μ_h дають загальну характеристику про ступінь розтріскування поверхні за двома координатними осями зображення. Однією з переваг використання середнього значення гістограм є чутливість цього методу до зміни напрямку поширення тріщини. Крім того, коефіцієнти μ_v та μ_h інваріантні щодо положення трі-

щини: якщо її зсунути вздовж однієї з координатних осей зображення, то середні значення будуть незмінні.

Для кожної гістограми обчислювали схожість як накопичену різницю між суміжними значеннями гістограми [10]:

$$\Omega_v = \sum_{j=1}^{m-1} |V_h(j+1) - V_h(j)|, \quad (5)$$

$$\Omega_h = \sum_{i=1}^{n-1} |H_h(i+1) - H_h(i)|, \quad (6)$$

де Ω_v , Ω_h – відповідно вертикальна та горизонтальна схожість.

За параметрами Ω_v та Ω_h оцінюють однорідність розтрісканої поверхні у двох координатних напрямках. Низький коефіцієнт схожості свідчить про незначні відмінності між окремими рядками (стовпцями) зображення. На практиці це відповідає однорідній картині розтріскування в певному напрямку.

Таким чином, пари узагальнених характеристик (середніх значень μ_v , μ_h та схожості Ω_v , Ω_h) дають змогу отримати комплексну інтегровану характеристику аналізованого зображення у двох взаємоперпендикулярних координатних напрямках.

Закономірності множинного розтріскування. Аналіз фізико-механічних закономірностей поведінки активних розломів і тріщин показав, що дослідженому матеріалу притаманний складний розподіл деформацій та зсувів, які спричиняють різні ступені деформування і зміщення фрагментів покриву [19]. Пластичні зсуви покриву зумовлюють зміну відносного положення між множинними дефектами. При цьому зміщення поверхні у горизонтальному напрямку вздовж розлому (зсуви) та під кутом до нього (насування) випадкові, тоді як вертикальна компонента переміщень має циклічний впорядкований характер [19].

Слід зазначити, що деформація поверхні визначається пластичним течінням основи та розкриттям множинних дефектів [20]:

$$\varepsilon = \varepsilon^{\text{int}} + \sum_{i=1}^p \frac{\delta_i}{l_k}, \quad (7)$$

де ε^{int} – деформація фрагментів покриву між тріщинами; δ_i – розкриття i -ої тріщини; p – кількість тріщин на дослідженій довжині l_k .

Цирконієвий нанопокрив можна розглядати як багаторівневу систему, в якій пластичне течіння розвивається як послідовна еволюція втрати стійкості на різних масштабних рівнях (мікро-, мезо-, макро-) [6, 21].

Отримані результати (рис. 4) показують, що за малих деформацій (до 15%) значення μ_v та μ_h зростають несуттєво – це означає, що загальна картина розтріскування залишається практично незмінною. Вищі значення μ_v вказують на більшу площу розтріскування у вертикальному напрямку, ніж у горизонтальному. При цьому деформування відбувається на мікрорівні, а концентраторами напружень є мікронеоднорідності структури [22]. Низький коефіцієнт вертикальної схожості Ω_v за деформацій до 15% свідчить про малу змінність картини розтріскування вздовж цієї координатної осі: значні фонові проміжки змінюються однорідними фрагментами тріщин.

Характер розвитку фрагментації покриву визначають параметрами розташованих вздовж нього тріщин [21]. З точки зору класифікації тріщин, інформативним є спектральний аналіз функцій $V_h(j)$ та $H_h(i)$. Застосувавши щодо них перетворення Фур'є, отримаємо множину гармонік, які характеризують картину розтріскування вздовж відповідної осі. Якщо поверхня містить переважно перпендикулярні до координатної осі тріщини, то у функції гістограми для цієї осі переважатимуть високочастотні складові (горизонтальна гістограма, див. рис. 3а). Гіс-

тограма для осі, вздовж якої направлені тріщини, містить головно низькочастотні складові (вертикальна гістограма, див. рис. 3b).

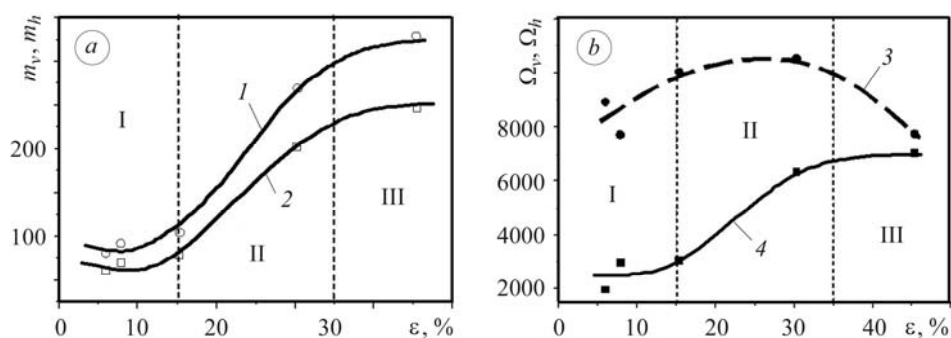


Рис. 4. Залежність інтегральних параметрів розтріскування від відносної деформації зразка ε : середні значення μ_h (1) та μ_v (2); схожість Ω_h (3) та Ω_v (4): I – мікро-; II – мезо-; III – макрорівень.

Fig. 4. Dependence of integral cracking parameters on the sample relative deformation ε : mean values μ_h (1) та μ_v (2); similarity Ω_h (3) та Ω_v (4): I – micro-; II – mezo-; III – macrolevel.

Як інтегральну величину, що характеризує амплітудний спектр функцій $V_h(j)$ та $H_h(i)$, використали центральну гармоніку C . Вона розподіляє спектр на однакові за площею частини і показує, які гармоніки роблять найбільший вклад у формування функції спектра (рис. 5). Побудовані (рис. 6) графіки зміни центральної гармоніки C_h та C_v для проаналізованих зображень (див. рис. 2).

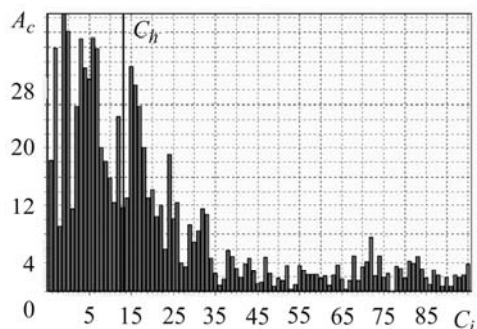


Рис. 5. Fig. 5.

Рис. 5. Амплітудний спектр функції H_h для зображення рис. 2a.

Fig. 5. Amplitude spectrum of H_h function for image Fig. 2a.

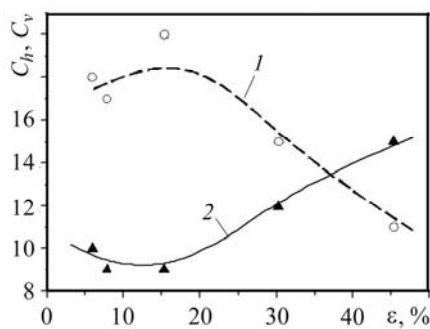


Рис. 6. Fig. 6.

Рис. 6. Залежність зміщення середини спектра C_h (1) та C_v (2) від відносної деформації ε .

Fig. 6. Dependence of the displacement range of the mid spectrum C_h (1) and C_v (2) on relatively strain ε .

Виявлено, що за малих відносних деформацій (до 15%), тріщини орієнтовані переважно у горизонтальному напрямку, а у функції горизонтальної гістограми H_h переважають гармоніки з вищими частотами. Водночас функція вертикальної гістограми V_h містить переважно низькочастотні гармоніки, що вказує на більшу однорідність розтріскування у горизонтальному напрямку.

За значних деформацій (на етапі руйнування покриття) величина C_h для горизонтальної гістограми стрімко знижується – спектр зміщується в сторону низькочастотних гармонік. Це підтверджує розорієнтацію тріщин та втрату ними переважно горизонтального напрямку. Проте спектр функції вертикальної гістограми

зміщується в сторону високочастотних гармонік, що вказує на посилений ріст тріщин вздовж вертикальної осі. Зазначимо, що залежності подані на рис. 6 відтворюють таку ж закономірність, як і зміна коефіцієнтів схожості (див. рис. 4b).

Стадійність та параметри множинного розтріскування. Розтріскування відбувається стадійно та одночасно з деформуванням, при цьому активуються тріщини у матеріалі, що пов'язано з їх вибіркоким підростанням та об'єднанням з більшими дефектами (див. таблицю).

Параметри та типи множинного розтріскування дослідженого цирконієвого нанопокриву

Відносна деформація покриву ε , %	Параметри пошкодження μ_v , μ_h	Тип тріщини	Домінуюча орієнтація тріщин ($0 \dots 180^\circ$), %
5,9	21,4 / 28,5	Поздовжні тріщини	65,18
7,8	27,9 / 37,2	Поздовжні тріщини	77,86
30,3	94,2 / 125,6	Поздовжні + + поперечні тріщини	49,13
45,4	134,4 / 179,1	Фрагментація та руйнування покриву	31,18

За відносної деформації $\varepsilon = 6,0 \dots 8,0\%$ покрив вкривається мережею горизонтально розташованих тріщин. Відносна деформація $\varepsilon = 15 \dots 35\%$ спричиняє зростання коефіцієнтів μ . Це вказує на активацію поширення тріщин в обох координатних напрямках, тобто на ротаційне та зсувне зміщення блоків матеріалу (мезорівень). Слід зазначити, що швидкість збільшення μ_v помітно вища. Оскільки горизонтальний напрям тріщин переважний, то швидше зростання коефіцієнта μ_v вказує, що на цьому етапі ширина тріщини (μ_v) збільшується суттєвіше, ніж довжина (μ_h). Перевага горизонтального напрямку підростання дефектів підтверджується високим значенням середньої гармоніки C_h .

За $\varepsilon = 15 \dots 35\%$ схожість суттєво зменшується – це вказує на утворення нових тріщин та їх розорієнтацію (див. рис. 2). Високі значення Ω_v та Ω_h за великих деформацій свідчать про складну неоднорідну картину розтріскування, зумовлену загальним руйнуванням покриву. На цьому ж етапі відбувається зміщення початкового високочастотного спектра функції V_h у сторону низьких частот, відхилення орієнтації тріщин від горизонталі. Елементарними носіями деформування на мезорівні є структурні елементи (фрагменти покриву), рух яких визначають за схемою “зсув + поворот” [23].

За $\varepsilon \approx 45\%$ відбуваються значні зміни в орієнтації тріщин, пов'язані з їх розкриттям та фрагментацією покриву, і завершальний етап – руйнування.

Стадійність розтріскування, активація та коалесценція дефектів залежить від деформаційних процесів [24]. Зокрема, на макрорівні вичерпування пластичності пов'язане з рівнем локалізації деформацій. Цей процес прогресує зі зростанням макродеформацій та підвищенням напружень у фрагментах покриву [25]. При цьому множинні дефекти в матеріалі частково збільшують його деформаційні властивості, спричиняючи “поглинання” енергії пружно-пластичних деформацій прилеглих ділянок [26].

ВИСНОВКИ

Досліджено спосіб оцінювання стану пошкодженої поверхні на основі аналізу її зображення і обчислення інтегральних параметрів вертикальної та горизонтальної гістограм. Запропоновано метод оцінювання стану розтріскування поверхні шляхом спектрального аналізу функцій гістограм. Показано можливість

класифікації тріщин за видами (поздовжні, поперечні, блочні тощо) шляхом обчислення інтегральних параметрів.

На основі запропонованої методики виявлено основні закономірності руйнування цирконієвого покриття, нанесеного на сталеву основу, за відносних деформацій від 5 до 45%. Встановлено, що окремим стадіям руйнування покриття відповідають свої інтегральні параметри. Запропоновано фізико-механічну інтерпретацію стадійності деформування матеріалу з множинними дефектами, яка забезпечується узгодженістю деформування матеріалу і розкриття дефектів. Це дає змогу використовувати запропонований підхід для технічного діагностування стану досліджуваної поверхні.

За досягнення граничного стану покрив поділяється на низку квазірегулярно розташованих фрагментів приблизно однакового розміру з формуванням регулярного рельєфу. На завершальних етапах деформування утворюється складчастий рельєф та ділянки множинного розтріскування з утворенням системи паралельних тріщин.

РЕЗЮМЕ. Проведена ідентифікація і кількісний аналіз сетки тріщин в цирконієвому нанопокритті на основі обробки цифрових зображень поверхні. Поведення дефектів оцінювали по результатам діагностики окремих етапів деформационного процесу. Установлено, що окремим стадіям руйнування покриття відповідають визначені інтегральні параметри зображення. На основі послідовної обробки даних множинного поверхнового растрескивання виявлені основні закономірності коалесценції окремих дефектів і фрагментації покриття. Установлено, що множинні дефекти в матеріалі збільшують його деформаційні властивості, викликаючи “поглинання” енергії еластично-пластических деформацій прилеглих часток. Представлені теоретичні передумови і експериментальні результати.

SUMMARY. Identification of the quantitative analysis of crack network in the zirconium nanocoating based on the digital imaging surface processing are described. The behavior of the defects was assessed by the results of diagnostics of individual stages of the deformation process. The basic laws of coalescence of individual defects and fragmentation of the coating was analysed on the base on the serial processing of multiple cracking of the surface. The presence of multiple defects in the material increases its deformation properties, causing the energy “absorption” of elastic-plastic deformation of the surrounding areas. Theoretical background and experimental results are presented.

1. *Calculations of theoretical strength: State of the art and history* / J. Pokluda, M. Černý, P. Šandera, M. Šob // *J. of Computer-Aided Materials Design*. – 2004. – **11**. – P. 1–28.
2. *Influence of deformation process in material at multiple cracking and fragmentation of nanocoating* / P. O. Maruschak, S. V. Panin, S. R. Ignatovich et al. // *Theor. and Appl. Fract. Mech.* – 2012. – **57**. – P. 43–48.
3. *Sevostianov I. and Kachanov M. Local minima and gradients of stiffness and conductivity as indicators of strength reduction of brittle-elastic materials* // *Int. J. of Fracture*. – 2010. – **164** (1). – P. 147–154.
4. *Allen D. H. and Searcy C. R. A model for predicting the evolution of multiple cracks on multiple length scales in viscoelastic composites* // *J. of Mat. Sci.* – 2006. – **41**. – P. 6510–6519.
5. *Kushch V. I., Sevostianov I., and Mishnaevsky L. Jr. Effect of crack orientation statistics on effective stiffness of microcracked solid* // *Int. J. of Solids and Struct.* – 2009. – **46**, № 6. – P. 1574–1588.
6. *Panin V. E., Goldstein R. V., and Panin S. V. Mesomechanics of multiple cracking of brittle coatings in a loaded solid* // *Int. J. of Fracture*. – 2008. – **150**. – P. 37–53.
7. *Деформування розломно-блокових середовищ з урахуванням зон множинного тріщиноутворення* / П. В. Ясний, П. О. Марущак, І. Б. Окіпний та ін. // *Закл. звіт україно-білоруського науково-досл. проекту (0111U008340)*. – Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. – 60 с.
8. *Strain stages and regularities of static fracture of 25Cr1Mo1V steel damaged by a network of thermal fatigue cracks* / P. V. Yasniy, P. O. Maruschak, S. V. Panin, P. S. Lyubutin // *13th Int. Conf. “Mesomechanics 2011” (6–8 July)*. – Italy: Vicenza, 2011. – P. 84–87.
9. *Zhu Z., German S., and Brilakis I. Visual retrieval of concrete crack properties for automated post-earthquake structural safety evaluation* // *Automation in Construction*. – 2011. – **20**(7). – P. 874–883.

10. *Hassani A. and Ghasemzadeh Tehrani H.* Crack detection and classification in asphalt pavement using image processing // *Pavement Cracking: Mechanisms, Modeling, Detection, Testing and Case Histories.* – 2008. – P. 891–896.
11. *Кількісний аналіз структурних змін у сталі внаслідок високотемпературної витримки у водні / О. З. Студент, Б. П. Русин, Б. В. Кисіль та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2003. – № 1. – С. 22–28.
(*Student O. Z., Rusyn B. P., Kysil' B. V., Kobasyar M. I., Stakhiv T. P., and Markov A. D.* Quantitative Analysis of Structural Changes in Steel Caused by High-Temperature Holding in Hydrogen // *Materials Science.* – 2003. – № 1. – P. 17–24.)
12. *Physical regularities in cracking of nanocoating and the method for automated determination of crack network parameters / P. O. Maruschak, I. V. Konovalenko, V. Gliha et al. // Book of abstracts of 19th Conf. on Materials and Technology (November 22–23).* – Slovenia, Portoroz, 2011. – P. 52.
13. *Деформация и разрушение образцов сталей 12Х1МФ и 25Х1М1Ф с наноструктурным покрытием при циклическом растяжении и знакопеременном изгибе / П. В. Ясний, П. О. Марушак, С. В. Панин и др. // IV Всероссийская конф. по наноматериалам “НАНО-2011” (1–4 марта).* – М.: Ин-т металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, 2011. – С. 452.
14. *Панин С. В., Марушак П. О., Любутин П. С.* Иерархические уровни деформирования теплостойкой стали с множественными дефектами // Тез. докл. Межд. конф. по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов (5–9 сентября). – Томск: ИФПМ СО РАН, 2011. – С. 73–75.
15. *Установка ионно-магнетронного напыления нанокристаллических покрытий (КВАНТ) / В. П. Сергеев, В. П. Яновский, Ю. Н. Параев и др. // Физическая мезомеханика.* – 2004. – 7, Спец. вып. 2. – С. 333–336.
16. *Increase of plasticity of maraging steels by means of ion beam nanostructuring of surface layer / O. V. Sergeev, M. V. Fedorischeva, V. P. Sergeev et al. // 10th Int. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows (September 19–24).* – Tomsk, 2010. – P. 342–344.
17. *Yasniy P., Konovalenko I., Maruschak P.* Investigation into the geometrical parameters of a thermal fatigue crack pattern // *WSEAS Int. Conf. “New aspects of engineering mechanics, structures and engineering geology”.* – Greece, Heraklion, Crete Island, 2008. – P. 61–66.
18. *Автоматизований аналіз поверхневих тріщин у конструкційних елементах / П. В. Ясний, П. О. Марушак, І. В. Коноваленко, Р. Т. Бишак // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2008. – № 6. – С. 83–88.
(*Yasniy P. V., Marushchak P. O., Konovalenko I. V., Bishchak R. T.* Computer analysis of surface cracks in structural elements // *Materials Science.* – 2008. – № 6. – P. 833–839.)
19. *Analysis of brittle coating fragmentation under uniaxial tension for Weibull strength distributions / J. Andersons, U. A. Handge, I. M. Sokolov, A. Blumen // Eur. Phys. J. B.* – 2000. – 17. – P. 261–268.
20. *Li V. C. and Wu H. C.* Conditions for pseudo strain-hardening in fiber reinforced brittle matrix composites // *J. Applied Mech. Review.* – 1992. – 45. – P. 390–398.
21. *Zhu Y. T., Liao X. Z., and Wu X. L.* Deformation twinning in nanocrystalline materials // *Progress in Mat. Sci.* – 2012. – 57 (1). – P. 1–62.
22. *Evaluation of hardening of plastically deformed steels / P. Yasniy, V. Hlado, P. Maruschak, D. Baran // Proc. of the 13th Int. Conf. “Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures” (July 1–6).* – Greece: Alexandroupolis, 2007. – P. 147–148.
23. *Maruschak P. O., Konovalenko I. V., Bishchak R. T.* Effect of thermal fatigue cracks on brittle-ductile deformation and failure of CBCM roller surface layers // *Metallurgist.* – 2012. – 56. – P. 30–36.
24. *Исследование локальных смещений материала, поврежденного сеткой трещин термической усталости / П. О. Марушак, Р. Т. Бишак, С. В. Панин, П. С. Любутин // Тез. докл. межд. науч.-техн. конф. “Современные проблемы машиноведения”, научные чтения посв. 115-летию со дня рождения П. О. Сухого, (28–29 октября).* – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2010. – С. 59–60.
25. *Konovalenko I. V. and Marushchak P. O.* Error analysis of an algorithm for identifying thermal fatigue cracks // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.* – 2011. – 47. – P. 360–367.
26. *Andersons J., Tarasovs S., and Leterrier Y.* Evaluation of thin film adhesion to a compliant substrate by the analysis of progressive buckling in the fragmentation test // *Thin Solid Films.* – 2009. – 517 (6). – P. 2007–2011.

Одержано 16.02.2012