

УДК 670.191.33

КОМП'ЮТЕРНЕ ОЦІНЮВАННЯ ГЛИБИНИ ТРІЩИН ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ВТОМИ ЗА ЇХ ДОВЖИНОЮ

П. О. МАРУЩАК, І. В. КОНОВАЛЕНКО

Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя

Описано аналіз та ідентифікування мережі поверхневих тріщин на основі оброблення цифрових зображень. Тривимірний аналіз проведено за комбінування двох вимірних параметрів: довжини і глибини тріщини. Грунтуючись на обробці обмеженої кількості даних, система може аналізувати розтріскування поверхні ролика машин безперервного лиття заготовок. Подано теоретичні передумови і експериментальні результати.

Ключові слова: *множинне розтріскування, цифрове зображення, деградація поверхні, діагностування.*

Множинне розтріскування є одним з найпоширеніших видів пошкоджень поверхні конструкцій тривалої експлуатації, які працюють за умов термомеханічного навантажування [1]. При цьому важливим завданням є оцінювання технічного стану аналізованої конструкції та забезпечення її роботоздатності [1, 2]. Оскільки термомеханічне навантажування спричиняє зародження поверхневих тріщин, то необхідне діагностування для зниження ризику непрогнозованого руйнування промислового обладнання під час технологічного процесу [3]. Отже, для оцінювання множинного розтріскування важливо знайти підходи чутливі до зміни геометрії множинних дефектів під час тривалої експлуатації.

Крім того, значна увага приділяється дослідженню та створенню так званих “інтерфейсних середовищ” – матеріалів, механічна поведінка яких значною мірою визначається локалізацією деформації на межах поділу структурних елементів (блоків). Надзвичайно важливо ідентифікувати межі поділу між цими елементами [4].

Відомі окремі методи ідентифікації множинних дефектів [5], зокрема є приклади успішного використання цифрового діагностування технічного стану валків прокатних станів [6]. Проте вони вимагають доопрацювання і адаптації до геометричних особливостей реальних тріщинуватих структур, що є складним науково-технічним завданням [7].

Хоча активно вивчають можливість створення узагальнених підходів до аналізу та синтезу діагностичних систем, оптимізації методів та процедур оцінювання пошкодженості конструкцій, розроблення критеріїв оцінювання граничного стану, ризик-аналізу для встановлення технічного стану обладнання в межах планового напруження, проте відсутні комплексні підходи, які б дали змогу кількісно оцінити кілька параметрів розтрісканої поверхні та проаналізувати характер зміни окремих складових тріщинуватої структури [8, 9].

Мета роботи – побудувати алгоритм ідентифікації елементів поверхневого розтріскування, описати і кількісно проаналізувати елементи мережі тріщин.

Цифрова дефектометрія у технічній діагностиці. Дефектометрія параметрів мережі тріщин є першим кроком до розуміння стану матеріалу з такими по-

шкодженнями [10, 11]. Для комплексного аналізу місця методів цифрової діагностики доцільно розглянути відомі [12–14] підходи в єдиній узагальненій системі діагностування технічного стану металургійного обладнання, які подані у вигляді структурної схеми (рис. 1). На ній зазначено та узагальнено основні напрями розвитку технічного діагностування металургійного обладнання, й уточнено зміст окремих понять стосовно аналізованої проблеми.

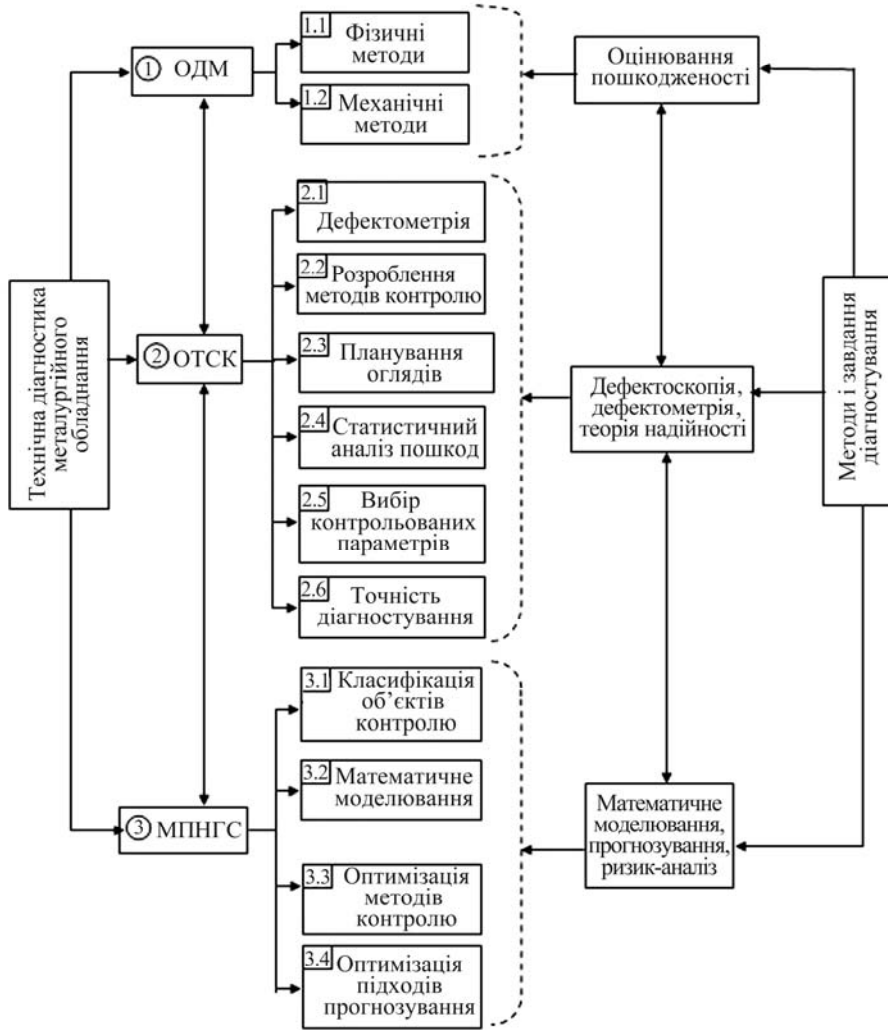


Рис. 1. Структурна схема діагностування технічного стану металургійного обладнання із зазначенням використаних наукових підходів.

Fig. 1. The scheme of the technical state diagnostics of metallurgical equipment with indication of the used scientific methods.

Технічне діагностування спрямоване на вивчення закономірностей деградації матеріалів, проявів пошкоджень конструкції, а також принципів та методів їх виявлення для розроблення науково обґрунтованих підходів до оцінювання їх технічного стану впродовж експлуатаційного періоду та прогнозування залишкового ресурсу.

Оцінювання деградації матеріалу (ОДМ) – виявлення структурних змін на мікро- (дислокаційна структура, розтріскування включень, субзерна, зерна), ме-

зо- (конгломерати зерен, зернограничне проковзування, гофрування поверхні) та макро- (зміна механічних властивостей) рівнях.

Оцінювання технічного стану конструкції (ОТСК) – виявлення фізико-механічних пошкоджень, дефектів та відхилень технічних параметрів конструкції від початкового стану та чисельне порівняння із граничними (критичними) значеннями цих пошкоджень (відхилень), розробка рекомендацій для підвищення тримкості та довговічності конструкції.

Моделювання і прогнозування напруцювання та граничного стану конструкції (МПНГС) – визначення із використанням методів математичної статистики ризику непрогнозованого руйнування конструкції з урахуванням пошкоджень та деградації структури, а також можливості та тривалості подальшої експлуатації.

Фізико-механічні передумови діагностування множинного розтріскування. Будь-яку ділянку поверхні з множинними тріщинами можна розглядати як сукупність структурних елементів (блоків), розділених тріщиноподібними дефектами [15]. Межі поділу блоків мають меншу міцність, ніж матеріал самих блоків, що зумовлює більшу піддатливість цих ділянок. Проте порушення суцільності металу тріщинами є одним зі способів релаксації напружень за умов циклічного та квазістатичного навантаження. Незважаючи на значну кількість механізмів деформування та руйнування, їх основою є локалізація напружень та пластичних деформацій в околі тріщиноподібних дефектів [16].

Виділяють кілька етапів множинного розтріскування: *розпорошене розтріскування* – результат зародження розпорошених тріщиноподібних дефектів (рис. 2a); *об'єднання тріщин* з утворенням мережі перетином окремих дефектів (рис. 2b); *блочне розтріскування* внаслідок коалесценції низки об'єднаних тріщин з утворенням повністю відокремлених блоків матеріалу, обмежених розвинутою мережею дефектів (рис. 2c).

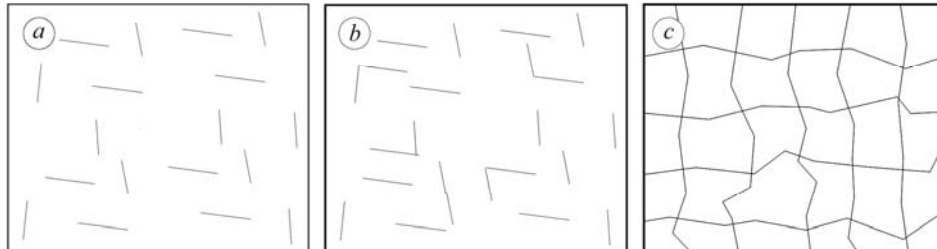


Рис. 2. Множинне розтріскування: *a* – розпорошене розтріскування; *b* – об'єднані тріщини; *c* – блочне розтріскування.

Fig. 2. Multiple cracking: *a* – distributed cracking; *b* – coalesced cracks; *c* – in-block cracking.

Фізико-механічні закономірності множинного розтріскування докладно проаналізовано у працях [17, 18], де обґрунтовано використання структурно-ієрархічного підходу, основою якого є твердження, що для коректного чисельного чи аналітичного моделювання властивостей тіла з множинними тріщиноподібними дефектами необхідно вивчити фізико-механічні закономірності розтріскування та параметри тріщиноподібних дефектів.

Переваги структурно-ієрархічного підходу [9, 17, 18]: врахування впливу параметрів елементів мережі тріщин на інтегральні властивості деформівного твердого тіла; впорядкованість результатів та збереження фізичних закономірностей, властивих реальному об'єкту, можливість їх подальшого оброблення та моделювання; взаємозв'язок між властивостями об'єктів з дефектами нижчого рівня (тріщин), їх сукупностей (мережі тріщин) та зразка (конструкції).

Проте для використання в межах цього підходу математичного апарату механіки деформівного твердого тіла є низка принципів обмежень [9, 17]. У зв'язку з цим перспективніше застосовувати методи цифрового діагностування. Одним з них є пропонуванний підхід, який передбачає можливість урахування (інтегрально та параметрично) особливостей множинного термомеханічного розтріскування [19, 20].

Алгоритм ідентифікації. Для комп'ютерного діагностування множинного розтріскування запропонували спеціальний алгоритм (рис. 3). Алгоритм розпізнавання тріщин на зображенні дослідного зразка складається з операцій фільтрування, бінаризації, скелетизації та визначення положення тріщин (рис. 3). Вихідним зображенням для аналізу є сіре багатоградацийне зображення досліджуваного зразка G , отримане з цифрової камери (рис. 4а).

Бінарне перетворення. Бінарне перетворення – первинна базова операція, яка призначена для виявлення частин зображення, що належать тріщинам, і виокремлення їх від фону [21]. Перетворення проводиться шляхом порівняння яскравості кожної точки зображення з певним граничним значенням. Для реалізації алгоритму використано адаптивний метод бінаризації, за якого межі перетворення обчислюють окремо для кожного фрагмента зображення [22]. Такий підхід дає змогу зменшити вплив нерівномірності освітлення під час отримання фотозображення на розпізнавання. З цією метою для кожного пікселя в його околі обчислюють середнє значення S_{ij} та дисперсію D_{ij} яскравості. Далі вихідному елементу присвоюється значення

$$B0_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{при } G_{ij} < S_{ij} + 0,3 \cdot D_{ij} , \\ 0, & \text{при } G_{ij} \geq S_{ij} + 0,3 \cdot D_{ij} . \end{cases} \quad (1)$$

На сумарному зображенні $B0$ (рис. 4b) чорні пікселі відповідають об'єкту (тріщині), а білі – фону.

Фільтрування. Проте внаслідок складної топографії тріщин отримане зображення $B0$ має дискретний характер і складається з великої кількості відокремлених ділянок, які належать одній і тій же тріщині. Тому для усунення із зображення малих шумів та підсилення на ньому головних тріщин його фільтрують дискретним гаусовим фільтром з квадратним ядром розміром $2H_k + 1 \times 2H_k + 1$ (рис. 4c), елементи якого обчислюють за формулою [12]

$$H_{ij} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{((i - H_k - 1)^2 + (j - H_k - 1)^2)}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

де σ – середньоквадратичне відхилення гаусіана.

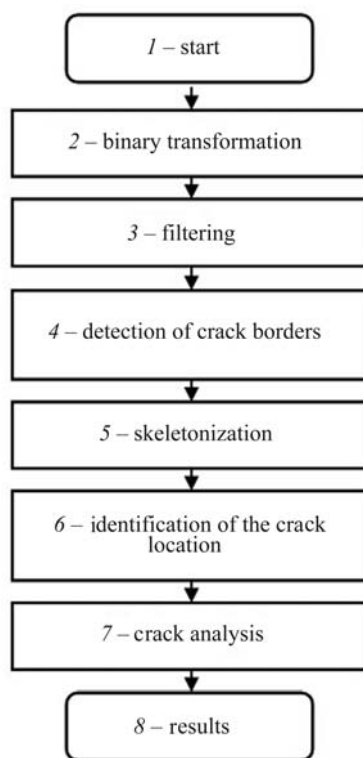


Рис. 3. Блок-схема алгоритму розпізнавання положення тріщин:

1 – початок; 2 – бінарне перетворення; 3 – фільтрування; 4 – виділення меж тріщини; 5 – скелетизація; 6 – визначення положення тріщини; 7 – аналіз тріщини; 8 – результати.

Fig. 3. Schema of algorithm of cracks position the recognition.

Після цього для окреслення меж тріщин одержане зображення згортається з фільтром, ядро якого описується матрицею

$$M = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (3)$$



Рис. 4. Бінаризоване та відфільтроване вихідне зображення:
a – вихідне багатоградацийне **G**; *b* – бінарне **B0**; *c* – відфільтроване **GF**.

Fig. 4. Image after binarization and filtering:
a – initial grayscale **G** image; *b* – binary **B0** image; *c* – filtered **GF** image.

В результаті таких операцій отримуємо відфільтроване зображення **GF** (рис. 4*c*), яскравість кожного елемента GF_i якого пропорційна кількості чорних пікселів на зображенні **B0** в околі GF_i . Фільтрування “розмиває” межі розпізнаних об’єктів зображення **B0**, в результаті чого близькі об’єкти з’єднуються, формуючи одну неперервну тріщину.

Виділення меж тріщин. Повторна бінаризація дає змогу на основі відфільтрованого багатоградацийного зображення **GF** сформувати масив точок, які описують положення тріщини й приймаються для подальшого розгляду. Для цього також використано адаптивний метод бінаризації (динамічну межу яскравості обчислюють окремо для різних частин зображення). В результаті отримуємо бінарне зображення **V** (рис. 5*a*).

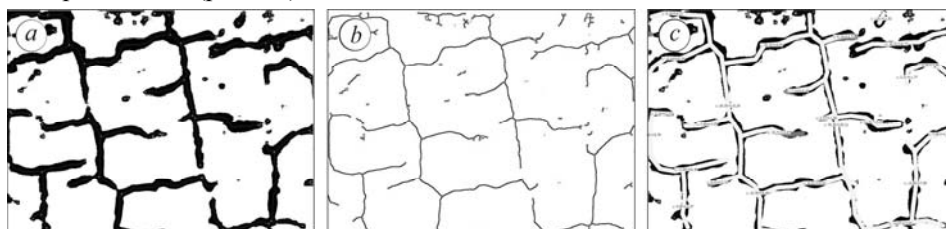


Рис. 5. Розпізнавання довжин та глибин дефектів: *a* – зображення **V** з розпізнаними тріщинами; *b* – скелетизоване зображення **S** (підсилене для візуалізації); *c* – розпізнані тріщини, накладені на зображення **V**.

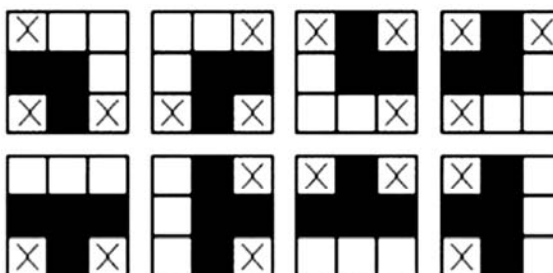
Fig. 5. Detection of defects lengths and depths: *a* – **V** image with detected cracks;
b – skeletonized **S** image (enhanced for the purpose of visualization);
c – detected cracks applied onto **V** image.

Скелетизація. Масив **V** містить інформацію про те, які частини вихідного зображення належать тріщинам, але він не може безпосередньо використовуватись для визначення таких параметрів, як кількість тріщин, їх довжина, нахил тощо. Для виділення каркасних ліній тріщин проводять скелетизацію [23], яка дає змогу виявити на зображенні тріщин серединні лінії завтовшки один піксель, на основі яких і роблять висновок про напрямок поширення та довжину тріщин (рис. 5*b*, *c*). Скелетне зображення **S** отримують шляхом багатопроходового на-

кладання на зображення **V** шаблонів (рис. 6). У кожній області, яка відповідає одному із шаблонів, видаляють центральний чорний піксель.

Рис. 6. Шаблиони для скелетизації. Знак “x” відповідає пікселям будь-якого кольору.

Fig. 6. Templates for skeletonization. Sign “x” corresponds to pixels of any color.



Визначення положення тріщин. На основі скелетизованого зображення формують масив базових точок **P**, кожна з яких кінцева або вузлова точка матриці **S**. Оскільки ділянка тріщини, яка з’єднує будь-які дві пов’язані базові точки, може суттєво відхилитися від прямолінійності, то у масив базових точок вносять проміжні точки скелетизованого зображення, розташовані з певним кроком відносно однієї з базових точок. Сукупність їх описують двонаправленими графами P_{GI} ($I \in (1...N)$), де N – кількість графів, що відповідає кількості “об’єднаних тріщин”. Ребра цих графів вказують на зв’язок між певними точками. Кожен граф P_{GI} містить інформацію про прямолінійні фрагменти тріщин, які з’єднують базові точки.

Після цього в межах кожного графу P_{GI} виділяємо найбільшу взаємозв’язану множину точок, які інтерполюються прямим відрізком із заданою точністю. Всі точки знайденого ланцюжка P_{PJ} , крім кінцевих, видаляємо з подальшого розгляду. Цю операцію виконуємо в циклі доти, поки всі вершини графу P_{GI} не ввійдуть у ланцюжки.

В результаті усіх вказаних операцій над зображенням отримуємо набір відрізків P_{PJ} ($J \in (1...M)$, де M – кількість відрізків), які апроксимують окремі тріщини зображення. Їх геометричні параметри відображають відповідні параметри (напрямок, довжина) тріщин вихідного зображення.

Результати двовірного (2D) аналізу. Результатом роботи алгоритму є ідентифікування мережі тріщин зображення **V** і обчислення їх кількісних параметрів (довжини, кількості одиничних та об’єднаних дефектів), а також напрямку поширення відносно горизонтальної площини (рис. 7).

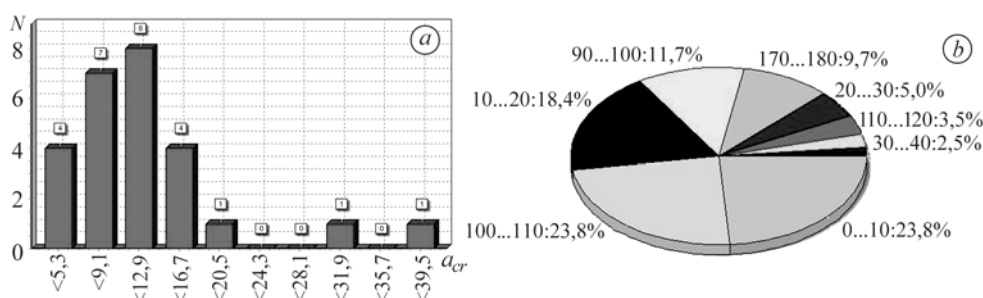


Рис. 7. Параметри розтріскування аналізованої ділянки поверхні ролика МБЛЗ: *a* – розподіл довжин тріщин; *b* – діаграма кутів розтріскування.

Fig. 7. Cracking parameters on the analyzed surface section of the CCM roller: *a* – distribution of crack lengths; *b* – histogram of cracking angles.

Довжиною тріщини (a_{cr}) вважали відстань між початковою та кінцевою точками відокремленого дефекта або елемента об’єднаної тріщини в межах стало орієнтованої ділянки, відповідно до визначень поданих у праці [8] та фізичних закономірностей множинного розтріскування роликів машин безперервного лит-

тя заготовок (МБЛЗ) [24]. Виявлено, що найбільше є тріщин довжиною $9,1 \text{ mm} < a < 12,9 \text{ mm}$, питома частка яких становить 31% від загальної кількості виявлених дефектів (рис. 7а).

Більшість тріщин орієнтовано взаємоперпендикулярно, що помітно на діаграмі кутів розтріскування (рис. 7b). На поверхні ролика ці напрямки розташовуються паралельно та нормально до його повздовжньої осі. Автоматизовано виявлені переважаючі напрямки розтріскування співпадають з отриманими раніше під час пошарового зішліфовування ролика МБЛЗ, знятого з експлуатації [24]. Аналіз орієнтації множинного розтріскування показує, що ріст тріщин термічної втоми очевидно спричиняє згинальні напруження перпендикулярні осі ролика [7].

Тривимірний аналіз тріщин. Для виявлення залежностей глибини тріщини від її довжини досліджували зразки зішліфовували у глибину з кроком $0,25 \text{ mm}$, виміряли тріщини і після зняття шару $h = 3,0 \text{ mm}$ фотографували (рис. 8а). Мала дискретність зашліфовування $h < c_{cr}$ дозволила проаналізувати зміну геометрії фронту кожної з тріщин по глибині та у контрольних точках одержати фотозображення двовимірних перерізів зішліфованих дефектів (рис. 8а). Одержали закономірності зміни довжини тріщини від її глибини, які дають можливість описати геометрію фронту тріщин. Виявлено, що тріщини поперечні до осі ролика є, як правило, довші, а поздовжні до осі об'єднуються з ними, формуючи мережу тріщин розпаду. Таким чином, об'єктом діагностичного контролю мають бути переважно "радіальні" тріщини, які найнебезпечніші (рис. 8b, c).

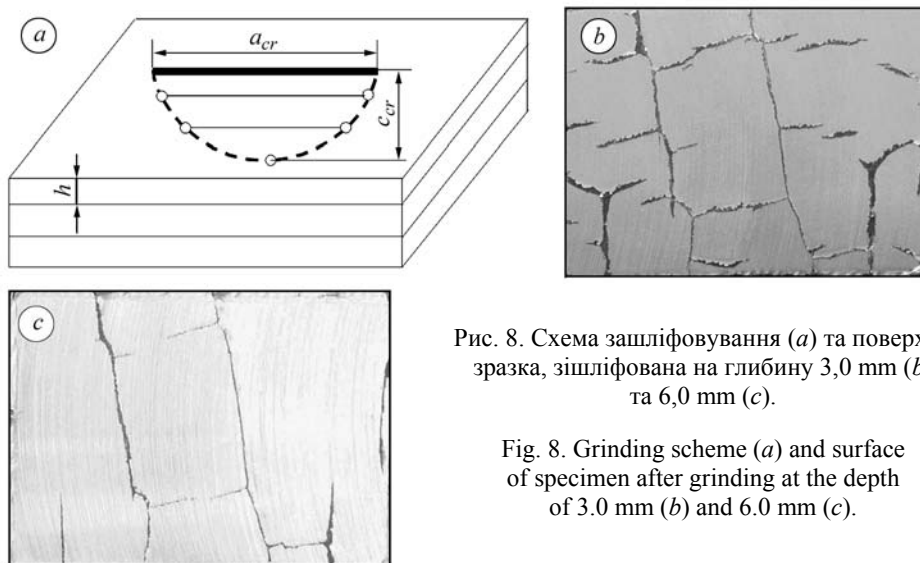


Рис. 8. Схема зашліфовування (а) та поверхня зразка, зішліфована на глибину 3,0 mm (b) та 6,0 mm (c).

Fig. 8. Grinding scheme (a) and surface of specimen after grinding at the depth of 3.0 mm (b) and 6.0 mm (c).

На початковому етапі пошкодження ролика множинне розтріскування та сумірність довжин суміжних тріщин спричиняють спотворення їх фронту внаслідок взаємовпливу та об'єднання. Слід підкреслити кілька характерних лінійних стадій тріщиноутворення, зокрема I відповідає тріщинам довжиною $a_{cr} = 20 \text{ mm}$. На цій стадії на форму фронту дефекту активно впливає розвантаження прилеглих ділянок матеріалу мережі тріщин розпаду, які сприяють релаксації напружень [24]. II стадія – $20 \text{ mm} \leq a_{cr} \leq a_{crmax}$ і аж до руйнування, що відповідає поширенню "довгих" дефектів (рис. 9). Введена стадійність має фізичне підтвердження і описана у попередніх працях [23, 24]. Оцінювання зміни форми дефектів дає змогу кількісно визначити ієрархічність процесів розтріскування та їх взаємовпливу (див. рис. 7).

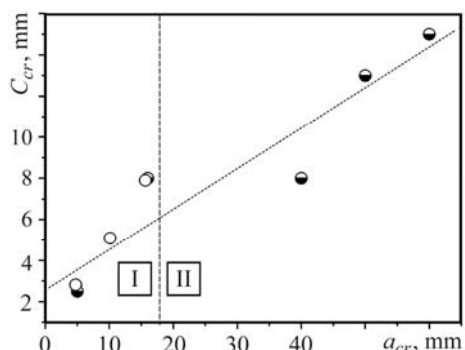
Реалізовано алгоритм визначення глибини тріщини за її довжиною. Згідно з експлуатаційними даними [7, 24] припустили, що глибина тріщини (c_{cr}) лінійно

залежить від її довжини $a_{cr} = kc_{cr} + b$ (рис. 9).

Якщо розглядати лише I стадію росту тріщини, то параметри її фронту набудуть значень: $k = 0,5$; $b = 0$. Проте за аналізу “довгих тріщин” на II стадії: $k = 0,19$; $b = 2,56$.

Рис. 9. Значення параметрів мережі множинного розтріскування, отримані під час зішліфовування натурального ролика МБЛЗ (●), обчислені за одержаним алгоритмом (○), та апроксимація (.....).

Fig. 9. Value of multiple cracks net parameters, after grinding of CSM roll (●), and calculated by the proposed algorithm (○) and approximation (.....).



Розроблений алгоритм дозволяє адекватно відтворювати глибину магістральних тріщин за параметрами ідентифікованої довжини дефекту і може бути використаний для експрес-аналізу розтріскування поверхонь металургійного обладнання [7, 23].

Розвинуті підходи дають змогу аналізувати кількісні показники розтріскування поверхневих шарів роликів МБЛЗ. Оскільки деформування матеріалу з тріщиноподібними дефектами визначають їх розподілом та орієнтацією [25], можливе прогнозування та моделювання властивостей розтрісканих матеріалів методом скінченних елементів на різних етапах множинного розтріскування [26]. Найперспективнішим для використання в умовах безперервного виробництва є метод оптико-цифрового контролю, який дає змогу ідентифікувати дефекти безконтактно, не зупиняючи лиття [27]. Він може бути основою експрес-аналізу стану конструкції. Співставлення можливостей розробленого та існуючих [4, 28, 29] методів дефектометрії великогабаритних конструкцій щодо їх використання в металургійному виробництві подано у таблиці.

Методи дефектоскопії та можливість їх використання для дефектометрії множинного розтріскування поверхні роликів МБЛЗ

Назва методу	Можливість використання методу без зупинки виробництва	Можливість дефектометрії елементів мережі тріщин
Оптичний (у т.ч. оптико-цифровий)	+	+
Капілярний	-	-
Акустичний	-	+
Магнетний	-	-
Вихрострумний (електротехнічний)	-	-
Радіохвильовий (у т.ч. тепловий та радіаційний)	-	Інтегральне оцінювання

Проте для достовірнішого оцінювання стану поверхні, пошкодженої сіткою тріщин розпалу, зокрема під час планових діагностично-ремонтних заходів, слід використовувати комплекс методів дефектоскопії, застосовуючи також ультразвуковий контроль [30].

ВИСНОВКИ

Запропоновано алгоритм і розроблено програмне забезпечення для оцінювання стану розтрісканої поверхні ролика з метою класифікування та опису геометрії тріщинуватих структур. Алгоритм апробовано для розпізнавання дефектів на поверхні ролика МБЛЗ. Запропонований підхід дає змогу за двовимірними зображеннями дефектів (2D) визначати їх глибину розтріскування (3D), а також кількісно характеризувати деградацію роликів МБЛЗ, орієнтацію окремих тріщин і розподіл елементів мережі множинного розтріскування.

РЕЗЮМЕ. Описана процедура анализа и идентификации сетки поверхностных трещин на основании обработки цифровых изображений. Трехмерный анализ проведен при комбинировании двух измеренных параметров: длины и глубины трещин. Основываясь на обработке ограниченного количества данных, система может анализировать растрескивание поверхности ролика машинного непрерывного литья заготовок. Представлены теоретические предпосылки и экспериментальные результаты.

SUMMARY. The analysis and identification of a set of surface cracks by means of a digital photography is described. The three-dimensional analysis is done by a combination of two measuring parameters: length and depth of cracks. Based on a limited number of data, the system is able to analyse the cracking on the continuous caster roll surface. Theoretical aspects and experimental results are presented.

Роботу фінансовано Державним агентством з питань науки, інновацій та інформатизації України (українсько-білоруський проект № Ф41.2/024).

1. Persson A., Hogmark S., and Bergström J. Temperature profiles and conditions for thermal fatigue cracking in brass die casting dies // J. Mat. Proc. Tech. – 2004. – **152**, № 2. – P. 228–236.
2. Stage I surface crack formation in thermal fatigue: A predictive multi-scale approach / S. Osterstock, C. Robertson, M. Sauzay et al. // Mat. Sci. and Engng.: A. – 2010. – **528**, № 1. – P. 379–390.
3. Писаренко Г. С., Можаровський Н. С., Антипов Е. А. Сопротивление жаропрочных материалов нестационарным силовым и температурным воздействиям. – К.: Наук. думка, 1974. – 200 с.
4. О влиянии состояния границ раздела на характер локальных смещений в разломно-блоковых и интерфейсных средах / С. Г. Псахье, В. В. Ружич, Е. В. Шилько и др. // Письма в журнал техн. физики. – 2005. – **31**, Вып. 16. – С. 80–87.
5. Наукові основи підвищення термовтомної тривалості нержавкої сталі шляхом наноструктуризації і контрольованого множинного розтріскування поверхневих шарів / П. В. Ясній, П. О. Марущак, І. Б. Окіпний та ін. // Закл. звіт україно-російського наук.-досл. проекту (0109U005863). – Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2010. – 116 с.
6. Integrated on-line work roll surface observation at the SIDMAR HSM / H. Uijtdebroeks, R. Franssen, D. Vanderschueren, P. M. Philippe // Proc. of the 44th MWSP Conf., Orlando (8–10 September). – 2002. – **XL**. – P. 899–908.
7. Марущак П. О. Розробка методів оцінювання технічного стану та залишкової довговічності тривало експлуатованих роликів машин безперервного лиття заготовок. – Автореферат дис. ... докт. техн. наук. – Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2010. – 34 с.
8. Wu X. and Xu L. Computer aided evaluation of thermal fatigue cracks on hot-work tool steel // Proc. of the 6th Int. Tooling Conf., Karlstad (10–13 September). – Sweden, 2002. – P. 781–792.
9. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов / Под ред. В. Е. Панина. – Новосибирск: Наука, 1995. – **1**. – 298 с.
10. 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, and P. S. Lyubutin // Proc. of the 13th Int. Conf. "Mesomechanics 2011", Vicenza, (6–8 July). – Italy, 2011. – P. 84–87.
11. Автоматизований аналіз пошкоджень тріщинами поверхні конструкційних елементів // П. В. Ясній, П. О. Марущак, І. В. Коноваленко, Р. Т. Біщак // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – **44**, № 6. – С. 83–88.
(Yasnii P. V., Marushchak P. O., Konovalenko I. V., Bishchak R. T. Computer analysis of surface cracks in structural elements // Materials Science. – 2008. – **44**, № 6. – P. 833–839.)
12. Рабинович В. И., Розов М. А., Тимонен Л. С. Предмет и задачи технической диагностики // Автометрия. – 1965. – № 1. – С. 27–34.

13. Марущак П. О., Коноваленко І. В. Измерение деформации материалов путем анализа цифровых изображений поверхности // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2010. – **76**. – № 6. – С. 55–60.
14. Влияние термоциклической наработки на разрушение стали 25X1M1Ф при статическом нагружении / П. О. Марущак, С. Р. Игнатович, А. П. Пилипенко, Р. Т. Бищак // Там же. – 2011. – **77**. – № 4. – С. 57–60.
15. Марущак П. О., Коноваленко І. В., Біщак Р.Т. Діагностування стану поверхні металургійного обладнання // Пр. Міжнар. наук. конф. “Математичні проблеми технічної механіки”. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2009. – С. 167–169.
16. Maruschak P. and Bishchak R. Localized deformation of heat – resistant steel with multiple cracks at mesolevel // Proc. of the 12th Int. Conf. “Advanced Materials and Technologies and European Doctorate in Physics and Chemistry of Advanced Materials” (August 27–31). – Lithuania, Palanga, 2010. – P. 34.
17. Kachanov M. Elastic solids with many cracks and related problems / Eds.: J. Hutchinson, T. Wu // Advances in Applied Mechanics. – Academic Press, 1994. – P. 256–426.
18. Srivastava A., Joshi V., and Shivpuri R. Computer modelling and prediction of thermal fatigue cracking in die-casting tooling // Int. J. Wear. – 2004. – **256**. – P. 38–43.
19. Патент України № 40741. Спосіб визначення поверхневої густини тріщин / П. О. Марущак, І. В. Коноваленко. – Опубл. 27.04.2009, Бюл. № 8.
20. Розпізнавання положення елементів сітки множинного розтріскування / П. О. Марущак, І. В. Коноваленко, С. В. Панін // 36. пр. Міжнар. конф. “Обчислювальна математика і математичні проблеми механіки” (31 серпня–4 вересня). – Львів: ІППММ ім. Я. С. Підстригача НАН України, 2009. – С. 157–159.
21. Автоматизоване визначення геометрії зерен в експлуатованій паропровідній сталі / І. М. Журавель, Л. М. Свірська, О. З. Студент та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – **45**, № 3. – С. 23–29.
(Zhuravel' I. M., Svirs'ka L. M., Student O. Z., Vorobel' R. A., and Nykyforchyn H. M. Automated determination of grain geometry in an exploited steam-pipeline steel // Materials Science. – 2009. – **45**, № 3. – P. 350–357.)
22. Кількісний аналіз структурних змін у сталі внаслідок високотемпературної витримки у водні / О. З. Студент, Б. П. Русин, Б. В. Кисіль та ін. // Там же. – 2003. – **39**, № 1. – С. 22–28.
(Student O. Z., Rusyn B. P., Kysil' B. V., Kobasyar M. I., Stakviv T. P., Markov A. D. Quantitative analysis of structural changes in steel caused by high-temperature holding in hydrogen // Ibid. – 2003. – **39**, № 1. – P. 17–24.)
23. Multiple cracks on continuous caster rolls surface: A three-dimensional view / P. Yasniy, P. Maruschak, I. Konovalenko et al. // Proc. of the 4th Int. Conf. “Processing and Structure of Materials” (May 27–29). – Serbia: Palić, 2010. – P. 7–12.
24. Thermal fatigue material degradation of caster rolls' surface layers / P. Yasniy, P. Maruschak, Y. Lapusta, et al. // Mechanics of Advanced Materials and Structures. – 2008. – **15**, № 6, 7. – P. 499–507.
25. On connections between 3-D microstructures and their 2-D images / I. Sevostianov, G. Agnihotri, and J. F. Garay // Int. J. Fract. – 2004. – **126**. – P. 65–72.
26. Huespe A. E., Cardona A., and Fachinotti V. Thermomechanical model of a continuous casting process // Computer Methods in Applied Mech. and Engng. – 2000. – **182**. – P. 439–455.
27. Diagnostics of thermal fatigue cracks on continuous caster rolls surface / P. Yasniy, P. Maruschak, I. Konovalenko, and R. Bishchak // Mechanika. – 2011. – **17**(3). – P. 251–254.
28. Бищак Р. Т., Марущак П. О., Коноваленко І. В. Ультразвукове діагностування поверхневого множинного розтріскування // Вісник Харківського націон. техн. ун-ту сільськогосп-ва ім. П. Василенка. – 2010. – **94**. – С. 73–77.
29. Марущак П. О., Біщак Р. Т., Окіпний І. Б. Вплив множинного розтріскування теплостійкої сталі на параметри магнітної дефектоскопії // 36. пр. XII Міжн. конф. “Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів” (6–8 жовтня). – Запоріжжя: ЗНТУ, 2010. – С. 68–69.
30. Nykyforchyn H. M. and Tsyruľnyk O. T. In-service degradation diagnostics of low-alloyed steels and aluminum alloys properties by electrochemical methods // Ultragarsas. – 2009. – **64**, № 1. – P. 46–49.

Одержано 29.06.2011