

УДК 670.191.33

ДЕГРАДАЦІЯ СТРУКТУРИ І ПОШКОДЖЕННЯ СІТКОЮ ТРІЩИН СТАЛІ МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ

П. В. ЯСНІЙ, П. О. МАРУЩАК, І. В. КОНОВАЛЕНКО, Р. Т. БИЩАК

Тернопільський державний технічний університет ім. Івана Пулюя

Розроблено автоматизований метод кількісного аналізу сітки тріщин для діагностування стану роликів машин безперервного лиття заготовок. Запропоновано структурну методологію ідентифікації тріщин. Показано ефективність методології виявлення тріщин на основі програмного оброблення цифрових зображень. Порівняно параметри сітки тріщин на окисненій поверхні зразків ролика після зішліфовування зовнішнього шару.

Ключові слова: *тріщини, сітка тріщин, аналіз зображення, діагностування тріщин.*

Експлуатація за умов термомеханічного навантаження обумовлює множинне розтріскування поверхні роликів машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). Зародження та злиття сітки тріщин впливає на енергію деформування поверхневих шарів матеріалу та забезпечує ефект самоорганізації множинного розтріскування – утворення макроскопічних дисипативних тріщинуватих структур [1–6]. Тому актуально розробити і вдосконалити оперативні методи діагностування стану поверхні за множинного розтріскування із урахуванням деградації матеріалу на локальних ділянках, зміни його структури і вичерпування пластичності [3].

Відомі методи лише частково відзеркалюють закономірності множинного розтріскування за термовтоми, а вплив експлуатаційних факторів на точність експрес-діагностування вивчений недостатньо [5–7]. Зокрема, внаслідок інтенсивного зовнішнього охолодження та контакту із слябовою заготовкою поверхня ролика вкривається шаром окислу, що ускладнює її діагностування та потребує усунення тонкого поверхневого шару [1, 3].

Нижче оцінено деградацію матеріалу приповерхневих шарів ролика МБЛЗ та вдосконалено методику виявлення і опису параметрів мережі множинних тріщин.

Методика оцінювання структурної деградації та множинного розтріскування. Досліджували фрагмент ролика МБЛЗ із сталі 25Х1М1Ф, що експлуатувався на МК ім. Ілліча (Маріуполь) та знятий з експлуатації через розтріскування робочої поверхні внаслідок термічної втоми, викликані періодичним контактуванням з розжареним до температури 1100...1200°C металом та охолодженням в атмосфері парів води. В зоні контакту температура поверхні ролика змінюється від 450...670°C, а в зоні охолодження – до 100...375°C [1]. З ролика вирізали темплет так, щоб структуру аналізувати у зоні термоциклічного навантаження *A* (рис. 1) на глибині до 5 mm від зовнішньої поверхні. Для цього використали металографічний мікроскоп Axiovert 40 MAT (Carl Zeiss). Крім того, структуру матеріалу аналізували поза зоною термоме-

Контактна особа: П. О. МАРУЩАК, e-mail: maruschak@tu.edu.te.ua

ханічного впливу у зоні *B* на глибині 50,0 mm від поверхні ролика. Темплети заздалегідь обробляли на шліфополірувальному верстаті типу *Bauehler Beta* та протравлювали в суміші азотної та соляної кислот.

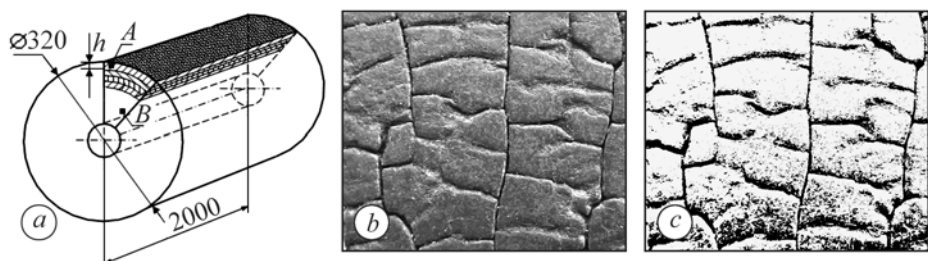


Рис. 1. Аналіз розтрісканої поверхні ролика МБЛЗ:
a – схема вирізання темплету з фрагмента; *b, c* – відповідно вихідне і бінаризоване зображення розтрісканої поверхні; *d* – фрагмент розпізнаного зображення.

Fig. 1. Analysis of a cracked surface of the casting machine (CCM) roll: *a* – scheme of specimen cutting; *b, c* – original and binary image of cracked surface; *d* – fragment of the analyzed image.

Оскільки множинне розтріскування вимагає аналізу геометрії значної кількості дефектів, для дослідження основних його закономірностей використали чисельний аналіз цифрових фотозображень поверхні ролика [5–8]. Чорно-білі фото тріщинуватих структур аналізували згідно з раніше розробленим алгоритмом [8–10], який дає можливість ідентифікувати структурні параметри (кількість і орієнтацію тріщин, відносну частку поверхневого розтріскування). Одержані результати задовільно узгоджуються з даними макроаналізу поверхні ролика [1, 3]. Оцінювали кількісні показники сітки тріщин (довжину, напрям поширення) на різних відстанях від поверхні ролика.

Деградація структури матеріалу. У початковому стані сталь 25X1M1Ф має ферито-перлітну структуру із чітко окресленими межами зерен (рис. 2*a*). Експлуатований матеріал поверхневого шару ролика на глибині до 5,0 mm має розсіяні пошкоди, розмиті міжфазні межі. В об'ємі феритних зерен і на їх межах карбіди набувають сферичної форми (рис. 2*b*).

Вичерпування пластичності матеріалу спричиняє зародження і коалесценцію мікрodefектів у кількох площинах ковзання, що в свою чергу обумовлює множинне тріщиноутворення [10, 11]. Аналіз шліфів приповерхневих ділянок на оптичному мікроскопі свідчить, що структура матеріалу в околі втомної тріщини подібна до структури поверхневого шару ролика (рис. 2*b, d*). Виявлено зону накопичення локальної деформації в околі фронту тріщини (рис. 2*c*).

Аналіз сітки тріщин термовтоми. Зовнішню поверхню темплету фрезерували з кроком 0,4 mm, щоб діагностувати зміну напряму поширення сітки тріщин. Розтріскану поверхню фотографували, перетворюючи початкові (півтонові) зображення у чорно-білі (бінарні). Їх розглядали як дискретну апроксимацію характеристичних функцій аналізованого об'єкта або статистично-геометричну модель тріщинуватої структури. Після перетворення на білому полі матриці чорним кольором відтворювалися аналізовані структурні елементи (контури, розміри). На кожному зображенні і бінарній картині було не менше 100 об'єктів, що є статистично визначеним масивом даних [8].

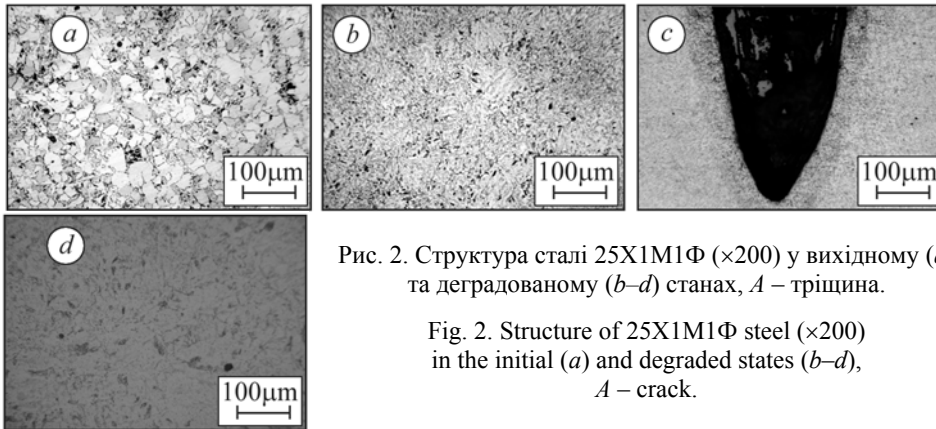


Рис. 2. Структура сталі 25X1M1Φ ($\times 200$) у вихідному (а) та деградованому (b–d) станах, А – тріщина.

Fig. 2. Structure of 25X1M1Φ steel ($\times 200$) in the initial (a) and degraded states (b–d), A – crack.

Скейлінгова відтворюваність розташування та розмірів тріщин вказує на структуроутворення за умов самоорганізації, характерне для негетерогенних середовищ. Елементи цифрової матриці дають можливість описати структурні перетворення сітки тріщин під час експлуатації [9]. Виявлено, що для всіх досліджених випадків понад 70% тріщин орієнтовані у взаємно перпендикулярних напрямках ($\theta = 0, 90^\circ$) (рис. 3).

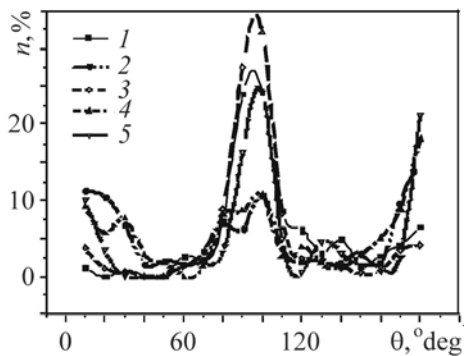


Рис. 3. Переважна орієнтація тріщин термовтоми в межах аналізованої ділянки на поверхні ролика (1) та на глибині 0,8 mm (2); 1,2 (3); 1,4 (4); 2,0 (5).

Fig. 3. The dominant orientation of thermal fatigue cracks within analyzed area on the roll surface (1) and at the depth 0.8 mm (2); 1.2 (3); 1.4 (4); 2.0 (5).

Окиснення поверхні ролика майже не впливає на відносну частку розтріскування $v = F_T/F$, де F_T – сумарна площа в межах аналізованої частини шліфа, що припадає на тріщини; F – площа досліджуваної ділянки шліфа [8]. Зокрема, на поверхні $v = 8\%$, а на глибині 1,2...1,6 mm, відповідно, 8 і 9% (рис. 4a). Зростання цього показника на глибині 0,4 mm до 20% і подальше зниження до 14% на глибині 0,8 mm пов'язане із неповним видаленням поверхневого окисненого шару та ідентифікацією прилеглих до берегів втомних тріщин як частки тріщинуватої структури.

Аналізували кількість “об’єднаних тріщин” в їх загальному масиві. Якщо одиничні тріщини мали хоча б одну спільну точку, їх вважали “об’єднаними”. Кількість таких тріщин (n_j), виявлених на поверхні та на глибині 0,8 mm, є стала, що свідчить про стабільність цього параметра навіть на окисненій поверхні (рис. 4b, c). Це зумовлено тим, що коалесценція притаманна насамперед найдовшим тріщинам, які добре ідентифікуються за досліджених умов [12, 13]. На глибині 1,2...1,6 mm питома частка об’єднаних тріщин знижується від 30 до 13...15%. Це зумовлено геометрією тріщин, які до глибини 4,0 mm мають практично округлу, а за більшої – півеліптичну форму [1].

На поверхні дослідженої ділянки ролика виявили 35 (15%) окремих тріщин. Після зішліфування тонкого шару (за умови неповного усунення окиснених поверхневих ділянок поблизу тріщин) їх кількість стрімко зростає. На глибині $h = 0,8$ mm і глибше кількість виявлених тріщин монотонно знижу-

ється внаслідок видалення найбільш тріщинуватого шару. Проаналізовано розподіл довжин тріщин L на поверхнях, розташованих на глибині h (рис. 5). Найбільше тріщин завдовжки $L_n = 2,0...3,0$ mm, найглибші – з довжиною $L=13,0$ mm.

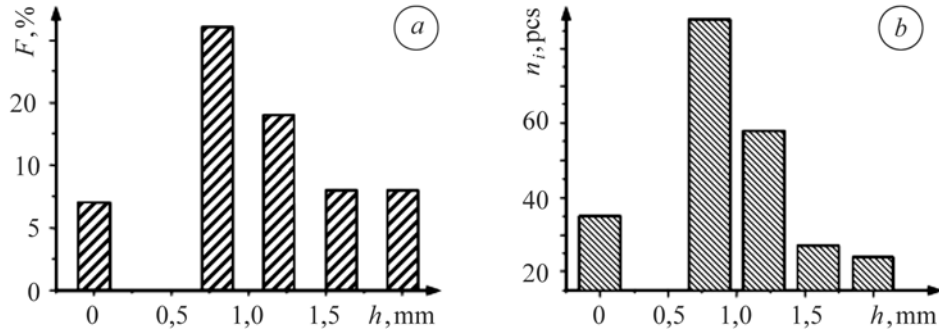
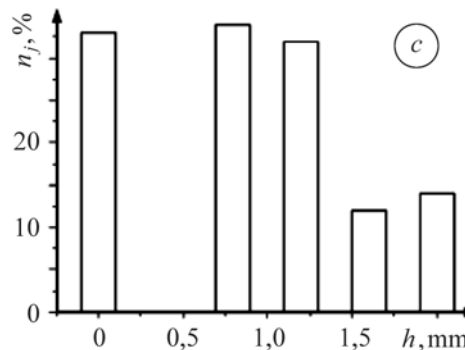


Рис. 4. Параметри розтріскування на різних відстанях від поверхні ролика: a – відносна площа, що припадає на тріщини, %; b – кількість виявлених тріщин, pcs.; c – кількість об'єднаних тріщин, %.

Fig. 4. Parameters of cracking at different distances from the roll surface: a – relative cracking area, %; b – amount of found cracks, pcs.; c – amount of joined cracks, %.



Таким чином, розроблено оригінальний метод, який можна ефективно використовувати для експрес-діагностування деградації поверхні роликів МБЛЗ, визначення показників розтріскування та напрямку поширення тріщин [13].

ВИСНОВКИ

Досліджено механізми деформування, що передують множинному розтріскуванню поверхні ролика МБЛЗ. За термомеханічного навантажування межі зерен фериту та перліту втрачають чіткість, накопичуються локальні пластичні деформації, які спричиняють зародження мережі тріщин. З допомогою оригінального методу, що ґрунтується на аналізі цифрового зображення, оцінено напрям множинного розтріскування і виявлено, що тріщини поширюються у взаємно перпендикулярних площинах.

Оцінено кількісні показники розтріскування ролика на різній глибині від зовнішньої поверхні. Запропоновано діагностичну інтерпретацію аналізова-

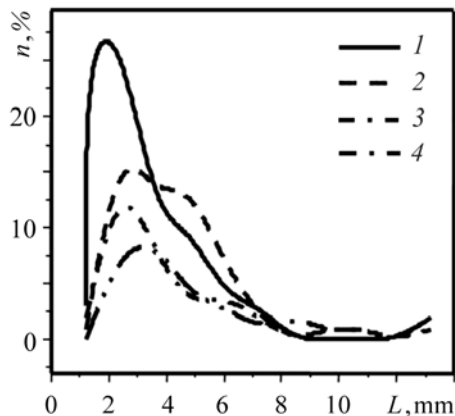


Рис. 5. Розподіл кількості виявлених тріщин на поверхні ролика (1) та на глибині 0,4 mm (2); 0,8 (3) та 1,2 (4).

Fig. 5. Distribution of the number of detected cracks on the roll surface (1) and at the analyzed area depth: 0.4 mm (2); 0.8 (3) and 1.2 (4).

них показників, зокрема, кількість об'єднаних тріщин та напрям розтріскування поверхні і приповерхневих шарів глибиною до 2 mm однакові. Максимальна довжина тріщин на поверхні конструкції та у приповерхневих шарах однакова. Внаслідок окиснення поверхні кількість ідентифікованих тріщин на глибині до 2,5 mm знижується у 1,5 рази.

РЕЗЮМЕ. Разработан автоматизированный метод количественного анализа сетки трещин для диагностики состояния роликов машин непрерывного литья заготовок. Предложена структурная методология идентификации трещин. Показана эффективность методологии обнаружения трещин с использованием обработки цифровых изображений. Исследования выполнены непосредственно на поверхности ролика с целью сравнения параметров сетки трещин на корродированной поверхности и после сошлифования внешнего слоя.

SUMMARY. An automated method for crack detection and quantitative description of crack systems was developed for service life assessment of continuous casting rolls. A structural methodology is proposed which is a variant of recently published morphological methods to identify cracks. This methodology of cracks detection using software of images processing is shown to be very effective. The tests were performed on the roll surface to compare the crack system parameters of corroded and polished surfaces.

1. *Thermal fatigue material degradation of caster rolls surface layers* / P. Yasniy, P. Maruschak, Y. Lapusta et al. // *Mech. of Adv. Mater. and Struct.* – 2008. – **15**. – Issue 6 & 7. – P. 499–507.
2. *Thermal fatigue cracks networks parameters and stability: an experimental study* / V. Maillot, A. Fissolo, G. Degallaix, S. Degallaix // *Int. J. of Solid and Struct.* – 2005. – **42**. – P. 759–769.
3. Ясній П. В., Марущак П. О., Баран Д. Я. Тріщиностійкість суцільнокованого ролика машини безперервного лиття заготовок // Тези доп. всеукр. конф. “Сучасні проблеми механіки” (5–8 грудня). – Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2005. – С. 40–41.
4. *Fedelich B. A stochastic theory for the problem of multiple surface crack coalescence* // *Int. J. of Fracture.* – 1998. – **91**. – P. 23–45.
5. *Glinicki M. A. and Litorowicz A. Crack system evaluation in concrete elements at mesoscale* // *Bull. of the Polish Acad. of Scien. (Tech. scien.)*. – 2006. – **54**, № 4. – P. 371–379.
6. *Abas F. and Martinez K. Craquelure analysis for content-based retrieval* // *Proc. 14th Int. conf. on digital signal processing.* – 2002. – **1**. – P. 111–114.
7. *Gordon G. G. Face recognition from depth maps and surface curvature* // *Proc. of SPIE conference on geometric methods in computer vision.* – San Diego, CA, 1991. – P. 234–247.
8. *Автоматизований аналіз пошкоджень тріщинами поверхні конструкційних елементів* / П. В. Ясній, П. О. Марущак, І. В. Коноваленко, Р. Т. Біщак // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2008. – № 6. – С. 83–88.
9. *Марущак П. О., Коноваленко І. В., Біщак Р. Т. Аналіз розтріскування поверхні і методика оцінки термовтоми матеріалів* // *Вісник Терноп. держ. техн. ун-ту.* – 2008. – № 1. – С. 33–37.
10. *Марущак П. О., Гладько В. Б., Біщак Р. Т. Влияние термоциклической наработки на свойства стали 25X1M1Ф* // *Тр. IV междунар. науч.-техн. конф. “Современные проблемы машиностроения”* (26–28 ноября). – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – С. 246–250.
11. *Кінетика руйнування теплостійкої сталі після термоциклічного напрацювання* / П. О. Марущак, Р. Т. Біщак, О. П. Ясній, А. П. Пилипенко // *Вісник Харківськ. нац. техн. ун-ту сільського господарства ім. П. Василенка.* – 2008. – **1**, вип. 75. – С. 493–497.
12. *Ясній П. В., Коноваленко І. В., Марущак П. О. До питання про дослідження геометричних параметрів сітки тріщин термічної втоми* // *Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту. Сер. Механіка.* – 2008. – **16**, № 5. – С. 182–189.
13. *Патент України № 39859 Спосіб оцінювання переважаючого напрямку пошкодження конструкції тріщинами термічної втоми* / П. О. Марущак, І. В. Коноваленко, Р. Т. Біщак. – Опубл. 10.03.2009; Бюл. № 5.

Одержано 15.04.2009