

УДК 621.325:669.539.43

КОМП'ЮТЕРНЕ ОЦІНЮВАННЯ РІЗНОЗЕРНИСТОСТІ СТРУКТУРИ ЕКСПЛУАТОВАНОЇ СТАЛІ 12Х1МФ

І. М. ЖУРАВЕЛЬ

Національний університет "Львівська політехніка"

Запропоновано метод оцінювання різнозернистості за металографічними зображеннями мікроструктури експлуатованої паропровідної сталі 12Х1МФ, вирізаної з прямолинійної ділянки та зони розтягу гину головного парогону ТЕС. Встановлено, що її рівень на прямій ділянці нижчий, ніж у зоні розтягу гину. З наближенням до зовнішньої і внутрішньої поверхонь труби на прямій ділянці труби зменшується, а в зоні розтягу гину зростає, що зумовлено інтенсивною деградацією матеріалу у важких експлуатаційних умовах.

Ключові слова: кількісна металографія, різнозернистість, аналіз металографічних зображень.

Якість металу як на стадії виготовлення, так і під час роботи суттєво залежить від внутрішньої мікроструктури. Тому практично усі фізико-механічні властивості матеріалу реагують на спотворення кристалічної ґратки, концентрацію домішкових атомів, порядок у розташуванні атомів компонентів, розмір зерна, появу частинок надмірної фази, зміну їх дисперсності тощо [1, 2]. Для однофазних матеріалів розміри, форма та розподіл зерен – одні з найважливіших характеристик металу. Відомо багато праць, присвячених методам кількісного обчислення усередненого діаметра зерен металу та аналізу їх форми [1–3]. Більшість із них базується на відомих стандартах – американському ASTM E 112, німецькому DIN 50601, міжнародному ISO 643 тощо. Метричний аналіз зерен ускладнений через непрозорість об'єктів вимірювання. Іншим недоліком існуючих методів є те, що вимірюють лише плоский зріз металу, не враховуючи його просторову структуру та різнозернистість.

Описано [3–5] результати дослідження, які свідчать про вплив однорідності зеренної структури на ресурс сталей тривалої експлуатації та їх фізико-механічні властивості. Зокрема, виявлено [4], що за рівних умов експлуатації на швидкість корозії зовнішньої поверхні зразків труб суттєво впливає різнозернистість, що вказує на якісні відмінності фізичних властивостей трубної сталі: що вона нижча (відповідно однорідніша зернова структура), то нижча швидкість корозії. Маючи інформацію про різнозернистість у вихідній мікроструктурі, можна прогнозувати швидкість корозії, а отже, в контрольованих умовах експлуатації визначити залишковий ресурс поверхонь нагрівання труб. Наведено [5] результати досліджень, які виявляють вплив різнозернистості матеріалу на опір повзучості, пластичність та ударну в'язкість. Досліджено [3] метод оцінювання різнозернистості структури за усередненими значеннями площі перерізу та діаметра зерна, проте він виявився непридатним для їх достовірного аналізу, зокрема, у праці [3] продемонстровано, що для двох структур з різною різнозернистістю можна отримати одні і ті ж їх усереднені значення.

Здебільшого для оцінки різнозернистості використовують стереологічні підходи, тобто будують криві розподілу за розмірами однієї із величин – довжини хорд,

Контактна особа: І. М. ЖУРАВЕЛЬ, e-mail: izhuravel@ukr.net

діаметрів плоских перерізів чи діаметрів зерен у об'ємі виробу [3]. На практиці через недоліки у формуванні шліфів зображення мікроструктури металів містять розмиті та розривні межі зерен, що призводить до суттєвих похибок. Тому актуально побудувати метод, який давав би можливість оцінювати різнозернистість за металографічними зображеннями, у т.ч. з розривними та розмитими межами зерен.

Об'єкт дослідження. Вивчали мікроструктуру сталі 12Х1МФ з прямої ділянки і з зони розтягу гину головного парогону ТЕС, експлуатованого $\sim 13 \cdot 10^4$ h (температура 540°C , тиск технологічного середовища 14 МПа). Розрахунковий ресурс таких ділянок $25 \cdot 10^4$ h. Незважаючи на те, що термін експлуатації гину склав лише половину розрахункового ресурсу, на зовнішній його поверхні в зоні максимального розтягу виявили мережу поздовжніх тріщин. Це пов'язано з повзучістю металу, яка залежить від розміру зерна, тому досліджували [2] зміну усереднених діаметрів зерен сталі поперек стінки труби в розтягнутій зоні гину та для порівняння – на прямій її ділянці. Вивчали також різнозернистість структури сталі.

Оцінювання різнозернистості. Аналізували цифрові металографічні зображення зразків сталі, отримані на оптичному мікроскопі NEOFOT 21 з використанням комп'ютеризованої системи фіксації. Для кількісної оцінки різнозернистості опрацювали цифрові металографічні зображення з розривними та розмитими межами зерен. Методи виділення контурів меж зерен на металографічному зображенні детально описані раніше у [2]. Основні труднощі, які тут виникали, зумовлені низькою візуальною якістю зображень, розмитістю та розривністю меж зерен (рис. 1).

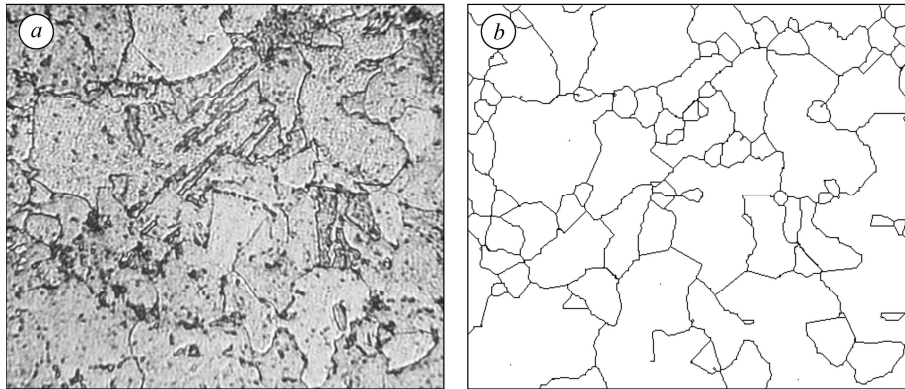


Рис. 1. Зображення структури сталі 12Х1МФ (а) та меж зерен (b).

Fig. 1. Image of 12X1MF steel structure (a) and grain of boundaries (b).

Далі на сформоване зображення меж зерен (рис. 1b) накладали сітку із взаємоперпендикулярних ліній (рис. 2). Для нерівновісних зерен лінії сітки доцільно проводити і під іншими кутами. Встановили [2] густину сітки, щоб отримати достовірний результат вимірювань усередненого діаметра зерна на зображеннях. Після цього підраху-

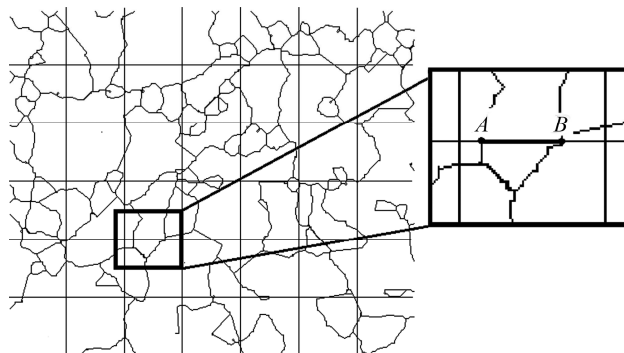


Рис. 2. Зображення меж зерен з нанесеною сіткою.

Fig. 2. The image of the grains boundaries with a grid.

вали кількість та довжину відрізків (хорд), які лежать на лініях нанесеної сітки (відрізок AB на рис. 2). Сформований набір відрізків є основою для статистичного аналізу різнозернистості структури матеріалу.

Відомо, що за випадкового перерізу будь-якої однорідної структури, яка складається із однакових куль чи кубів, одержимо на площині переріз у вигляді кругів або багатокутників різних конфігурації та розмірів – від максимального, тобто відповідного розміру в об'ємі, до мінімального. За перетину зображення меж зерен (рис. 2) прямими лініями сітки отримаємо аналогічні результати – набір відрізків від максимального розміру, який відповідатиме максимальній хорді у площині зображення меж зерен, до нуля (рис. 3).

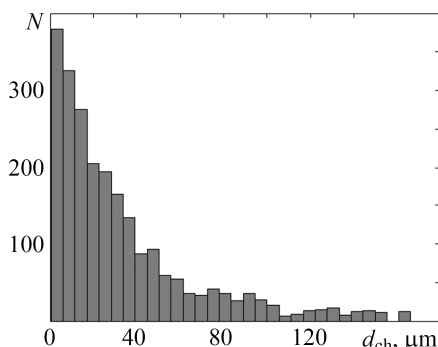


Рис. 3. Гістограма розподілу кількості хорд N різних довжин d_{ch} , які належать лініям сітки та з'єднують межі зерен.

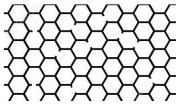


Fig. 3. The histogram of the distribution of chords number N of different lengths d_{ch} , belonging to the grid lines and connecting the grain boundaries.

Проаналізуємо результати, подані на рис. 3. Для цього спочатку обчислимо усереднений діаметр зерен на металографічному зображенні (див. рис. 1а) згідно з відомим методом [2]: $\bar{d} = 26 \mu m$. Гістограма розподілу хорд містить значення довжин, що суттєво перевищують обчислений усереднений діаметр \bar{d} , та хорди, які менші за нього. Найчастіше такий розподіл хорд свідчить про різнозернистість на металографічному зображенні. На практиці через недоліки у формуванні таких зображень межі зерен мають багато розривів, що призводить до появи зайвих хорд та неправильного обчислення усереднених діаметрів зерен металу.

Таким чином, гістограма розподілу хорд не надає чіткої та однозначної інформації про усереднений діаметр зерна.

У працях [3, 6, 7] різнозернистість оцінювали за гістограмою. Запропонували [6] аналізувати різнозернистість за відношенням частки зерен, розміри перетину яких відрізняються від середніх. Але тоді не вдається отримати інформацію про максимальний та найімовірніший діаметри зерен, які найсуттєвіше впливають на фізико-механічні властивості матеріалу. Це призводить до неточностей, тому тут необхідні нові методи. Пропонуємо для цього спектр фрактальних розмірностей Реньї [8]. Дослідимо його переваги на прикладі набору тестових зображень з різною кількістю розривів меж зерен (табл. 1).

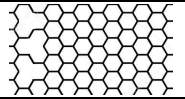
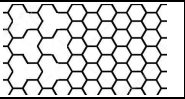
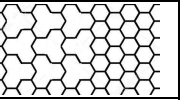
Таблиця 1. Аналіз тестових зображень з різною кількістю розривів меж зерен

Кількість розривів на зображенні	10	30	50
Тестові зображення з різною кількістю розривів меж зерен			
Усереднений діаметр зерна \bar{d} (у пікселях), обчислений методом січних	45,9	51,7	72,9
Відстань за Чебишевим k між спектрами фрактальних розмірностей зображення без та з розривами	0,0087	0,0115	0,0138

За відсутності розривів усереднений діаметр рівний 45,9 пікселів, а коли їх кількість зростає до 50%, становить 72,9 пікселів, що в 1,6 рази перевищує усереднений діаметр зерен без розривів [2]. Тому оцінювання різнозернистості за вимірюванням усереднених діаметрів зерен на металографічних зображеннях з розривами пов'язано зі значними похибками.

Експериментально виявили, що для змодельованих зображень без розривів та з ~50 розривами меж зерен відстань за Чебишевим між спектрами фрактальних розмірностей знаходиться у межах від 0 до 0,0138 (табл. 1). Аналогічні результати отримали раніше [9], де фрактальну розмірність застосовували для аналізу металографічної структури. Отже, для оцінки металографічних зображень з невисокою візуальною якістю, зокрема, з розривами меж зерен, доцільно вживати фрактальні розмірності. Встановили, що зі збільшенням рівня різнозернистості на змодельованих зображеннях відстань за Чебишевим між спектрами фрактальних розмірностей Реньї змінюється від 0,0215 до 0,0607 (табл. 2).

Таблиця 2. Аналіз тестових зображень з різною різнозернистістю

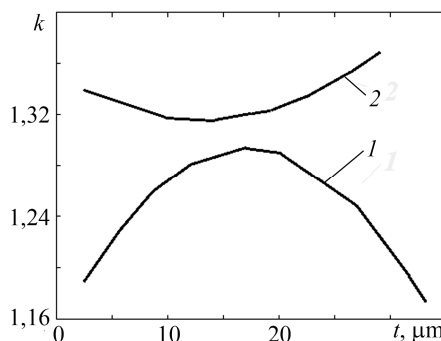
Зображення			
Відстань за Чебишевим k між спектрами фрактальних розмірностей зображень зі збільшенням різнозернистості	0,0215	0,0299	0,0607

Таким чином, експериментальні дослідження модельних зображень виявили залежність між відстанню за Чебишевим між спектрами фрактальних розмірностей Реньї та різнозернистістю структури металів. Це вказує на їх доцільність для аналізу різнозернистості та перспективність фрактального моделювання під час оцінки структури і властивостей матеріалів [10].

Апробація методу. З його допомогою оцінювали різнозернистість зразків сталі 12Х1МФ, вирізаних поперек стінки труби з прямої ділянки і з зони розтягу гину головного парогону ТЕС, за їх металографічними зображеннями. Виконані обчислення підтвердили пропорційність зміни відстані за Чебишевим k між спектрами фрактальних розмірностей до рівня різнозернистості. Встановили, що різнозернистість на прямій ділянці (рис. 4, крива 1) нижча, ніж у зоні розтягу гину (рис. 4, крива 2) головного парогону ТЕС. Також вона в обох випадках неоднакова всередині стінки труби та на її краях. Це можна пояснити специфікою рекристалізаційних процесів у суттєво деформованому металі, а також проявами інтенсивної деградації металу гину під час експлуатації.

Рис. 4. Зміна відстані за Чебишевим k між спектрами фрактальних розмірностей зображень для зразків сталі з прямої ділянки труби (1) і розтягнутої зони гину (2) на різній віддалі t від внутрішньої поверхні труби.

Fig. 4. The change in the distance by Chebyshev k between the spectra of the fractal dimensions of the images for the steel samples from the straight section of the pipe (1) and the stretched zone of the guine (2) at a different distance t from the inner surface of the pipe.



ВИСНОВКИ

Запропоновано метод комп'ютеризованого оцінювання різнозернистості мікроструктури експлуатованої паропровідної сталі 12Х1МФ за металографічними

зображеннями, який простіший в реалізації та достовірніший проти відомих. За віддалю за Чебишевим між спектрами фрактальних розмірностей Реньї встановили, що різнозернистість на прямій ділянці паропроводу нижча, ніж у зоні розтягу гину. З наближенням до зовнішньої і внутрішньої поверхонь труби вона на прямій ділянці труби зменшується, а в зоні розтягу гину зростає, що викликано інтенсивною деградацією матеріалу у важких експлуатаційних умовах.

РЕЗЮМЕ. Предложен метод оценки разнотерности по металлографическим изображением микроструктуры эксплуатируемой паропроводной стали 12Х1МФ, вырезанной из прямолинейного участка и зоны растяжения изгиба главного парогонга ТЭС. Установлено, что ее уровень на прямом участке ниже, чем в зоне растяжения изгиба. С приближением к внешней и внутренней поверхностям трубы на прямом участке трубы уменьшается, а в зоне растяжения изгиба растет, что вызвано интенсивной деградацией материала в тяжелых эксплуатационных условиях.

SUMMARY. The method of computerized evaluation of heterogeneous grains by metallographic images of microstructure of exploited steam-conducting steel 12Х1МФ, cut out from the straight section and tension and zone of the bent of main steam pipeline of HPP is proposed. It is established that its level in the straight line is lower than in the zone of tensile bending. With the approach to the external and internal surfaces of the pipe it on the straight line of the pipe decreases and in the zone of tensile bending – increases, what is caused by the intensive degradation of material under heavy operating conditions.

1. Комп'ютерний аналіз характерних елементів фрактографічних зображень / Р. Я. Косаревич, О. З. Студент, Л. М. Свірська, Б. П. Русин, Г. М. Никифорчин // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – **48**, № 4. – С. 53–60.
(Computer analysis of characteristic elements of fractographic images / R. Ya. Kosarevych, O. Z. Student, L. M. Svirs'ka, B. P. Rusyn, H. M. Nykyforchyn // Materials Science. – 2013. – **48**, № 4. – P. 474–481.)
2. Автоматизоване визначення геометрії зерен в експлуатованій паропровідній сталі / І. М. Журавель, Л. М. Свірська, О. З. Студент, Р. А. Воробель, Г. М. Никифорчин // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – **45**, № 3. – С. 23–29.
(Automated determination of grain geometry in an exploited steam-pipeline steel / I. M. Zhuravel, L. M. Svirs'ka, O. Z. Student, R. A. Vorobel, H. M. Nykyforchyn // Materials Science. – 2009. – **45**, № 3. – P. 350–357.)
3. Лезинская Е. Я. Методы оценки структурной неоднородности металла труб оболочек ТВЭЛ и чехлов ТВС из коррозионно-стойких сталей и сплавов // Вопросы атомной науки и техники. – 2003. – № 3. – С. 108–112.
4. Помазова А. В., Панова Т. В., Геринг Г. И. Влияние разнотерности структуры на коррозионную стойкость наружной поверхности труб из углеродистой стали 20, применяемых в теплоэнергетике // Вестник Южно-Уральск. гос. ун-та. Сер.: Металлургия. – 2014. – **14**, № 4. – С. 37–44.
5. Оценка качества металла лопаток газовых турбин по микроструктуре / И. П. Гладкий, В. П. Тарабанова, Э. Б. Хоботова, Л. Д. Мищенко / Вестник Харьковск. нац. автомобильно-дорожн. ун-та. – 2011. – Вып. 54. – С. 134–137.
6. Спектор А. Г. Дисперсионный анализ сферических частиц в непрозрачных структурах // Заводская лаборатория. – 1950. – **16**, № 2. – С. 173–177.
7. Журавель І. М. Аналіз текстури фрактографічних зображень на основі спектра фрактальних розмірностей Реньї // Искусственный интеллект. – 2013. – № 1. – С. 204–208.
8. Горелик С. С. Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1978. – 568 с.
9. Журавель І. М., Свірська Л. М. Вимірювання усередненого розміру зерен металу з використанням фрактальної розмірності // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – **46**, № 3. – С. 126–128.
(Zhuravel' I. M., Svirs'ka L. M. Measurement of the mean grain size in a metal by using fractal dimensions // Materials Science. – 2010. – **46**, № 3. – P. 418–420.)
10. Большаков В. І., Волчук В. М., Дубров Ю. І. Застосування фрактального моделювання при оцінці структури і властивостей металів // Металознавство та терм. обробка металів. – 2018. – № 1. – С. 50–55.

Одержано 06.12.2018