

УДК 620.186 (084.127)

А.В. Шостак, В.В. Широков, В.М. Мельник, Ю.А. Мельник, О.Ю. Смола
КІЛЬКІСНИЙ АНАЛІЗ МІКРОСТРУКТУРИ В
ТРИБОМАТЕРІАЛОЗНАВСТВІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ФУР'Є-АНАЛІЗУ ТА
ФУНКЦІЙ УОЛША

У сучасних умовах, дослідження на мікрорівні у матеріалознавстві набули важливого значення при отриманні інтегральних характеристик мікрооб'єктів на основі аналізу растрово-електронно-мікроскопічного (РЕМ) зображення. У статті проведено аналіз відомих методів і алгоритмів цифрової обробки зображень з метою отримання топологічних характеристик мікрооб'єктів.

Ключові слова: растрова електронна мікроскопія, Фур'є аналіз, функції Уолша, цифрова обробка зображень.
Форм. 7. Табл. 1. Літ. 12.

А.В. Шостак, В.В. Широков, В.М. Мельник, Ю.А. Мельник, О.Ю. Смола
КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ В
ТРИБОМАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФУРЬЕ-АНАЛИЗА И
ФУНКЦИЙ УОЛША

В современных условиях, исследования на микроуровне в материаловедении приобрели важное значение при получении интегральных характеристик микрообъектов на основе анализа растрово-электронно-микроскопического (РЭМ) изображения. В статье проведен анализ известных методов и алгоритмов обработки изображений с целью получения топологических характеристик микрообъектов.

Ключевые слова: растровая электронная микроскопия, Фурье анализ, функции Уолша, цифровая обработка изображений.

A. Shostak, V. V. Shyrovkov, V. M. Melnik, J. A. Melnik, A. U. Smola
QUANTITATIVE ANALYSIS OF THE MICROSTRUCTURE OF MATERIALS
SCIENCE IN THE TRIBE USING FOURIER ANALYSIS AND FUNCTIONS OF
WALSH

Under current conditions, the micro-level studies in materials science became important in the preparation of the integral characteristics of micro-objects based on analysis of raster electron microscopy (SEM) images. The article analyzes the well-known methods and algorithms for image processing in order to obtain the topological characteristics of microscopic objects.

Key words: scanning electron microscopy, Fourier analysis, Walsh functions, digital image processing.

Постановка проблеми. Процеси зношування характеризуються змінами мікро- та субмікроструктури вихідного інструментального матеріалу. Аналіз цих змін, їх вплив на характер зношування та стійкість, дають можливість більш точно описати фізичну природу процесів зношування та розробити методи попереднього їх зміцнення. Таким чином, проблеми, яким присвячена робота, є актуальними.

Висока роздільна здатність та особливо велика глибина фокуса, простота підготовки об'єктів досліджень, широкі можливості елементного аналізу при використанні різних систем реєстрації рентгенівського випромінювання дозволяють успішно використовувати методику растрової електронної мікроскопії (РЕМ) у матеріалознавчих дослідженнях для вивчення структури й елементного складу поверхонь зношування, тертя, руйнування, корозії, хімічної взаємодії, включень і т.д.

Дослідження природи процесів, що мають місце при формуванні експлуатаційного рельєфу на робочій поверхні сплавів, під час зношування в різних умовах займають одне з ведучих місць в проблемі тертя і зношування. Природа процесів зношування є однією з найбільш складних проблем в області трибоматеріалознавства. Для їх вирішення потрібно мати чіткі уявлення про фізичні, хімічні і геометричні властивості формування експлуатаційного рельєфу. При цьому особливої уваги заслуговують геометричні властивості, оскільки їх вивчення повинно сприяти розширенню існуючих уявлень про виникнення під час тертя і зношування так званої рівноважної шорсткості поверхні.

РЕМ-стереофотограмметричний метод дозволяє одержувати тривимірну оцінку довільних поверхонь і, отже, значно розширює можливості фрактографічних досліджень.

Проте для комплексного вивчення поверхні матеріалів за РЕМ-зображенням необхідно розробити методику розрахунку феноменологічних характеристик, які б визначали найбільш загальні властивості поверхні, що характеризують її стан і мікрорельєф. Така методика повинна забезпечити розрахунок метричних і фрактальних параметрів, що можливо при наявності відповідних алгоритмів і програмного забезпечення. Розрахунок метричних параметрів (функціональних і просторових) дозволяє більш повно представляти інформацію про поверхні матеріалів за даними РЕМ. Серед амплітудних параметрів окремо слід виділити кореляційні, які надають можливість оцінювати однорідність рельєфу поверхні, виявляти наявність кореляційних зв'язків та розміри зон кореляції. Дана методика може бути використана при проведенні досліджень в матеріалознавстві, а також при проведенні сертифікації поверхонь у мікро- та нанометровому діапазоні відповідно до норм і вимог міжнародних стандартів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значні зміни в методиці досліджень у трибоматеріалознавстві відбулися з відкриттям скануючої електронної мікроскопії, а також із застосуванням методів комп'ютерної графіки. Серед важливих слід виділити дослідження:

- Синдо Дайзуке. Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия. - Москва: Техносфера, 2006.
- Иевлев В. М. Просвечивающая электронная микроскопия неорганических материалов. - Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2003.
- Грудин Б. Н. Моделирование и анализ изображений в электронной и оптической микроскопии. - Владивосток: Дальнаука, 2001.
- Colliex Christian. La microscopie electronique. - Paris: PUF, 1998.
- Гоулдстейн Дж. и др., Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ, М: «Мир», 1984.

Також, відповідні дослідження наведено у [3, 5, 6, 7, 8, 10].

Як показав проведений аналіз, поширена методика кількісного аналізу мікроструктури є досить різносторонньою, кожен з методів має свої особливості проведення досліджень, з якими зв'язані відповідні переваги та недоліки методу при вирішенні конкретних практичних та теоретичних задач.

Невирішені раніше частини загальної проблеми. Проведений аналіз наведених вище та інших відомих досліджень дозволив виділити перспективні сфери застосування у кількісному аналізі мікроструктури окремих методів досліджень, і серед них – рядів Фур'є (Фур'є-аналізу) та системи ортогональних функцій Уолша, що більш детально проаналізовано нижче.

Метою дослідження є розробка стереофрактографічних методів розв'язку теоретичних та прикладних задач проблем руйнування.

Виклад основного матеріалу. На мікрорівні досить складно отримати коректну інформацію про процеси, які там відбуваються, встановити механізм і динаміку процесів зломів та зношування. В той же час РЕМ-фотограмметрія дає можливість розв'язувати ряд питань цієї проблеми.

При кількісному аналізі РЕМ-зображення часто виникає необхідність топологічного опису мікрооб'єктів. Це можуть бути пори, різного роду включення та ін.

Досить повною топологічною кількісною характеристикою мікрооб'єктів (наприклад, часток або пор), що не мають кристалографічно правильної огранки, є коефіцієнти розкладання функції границі досліджуваних об'єктів за системою ортогональних функцій. Для цієї мети в стереології часто застосовується розкладання в ряд Фур'є.

Для проведення стереологічного аналізу РЕМ-зображень у лабораторії електронної мікроскопії МДУ (м. Москва) під керівництвом доктора г.-м. наук Соколова В.М. при нашій участі розроблений комплекс РЕМ «Hitachi S-800–ПК», що дозволяє виконувати в режимі реального часу цифрову стереологічну обробку РЕМ-зображень. Програмне

забезпечення здійснено відлагодженим і протестованим пакетом програм «Stiman».

Для визначення форми мікрооб'єктів виконується передача з РЕМ на ЕОМ координат кінцевого числа точок їх границь, тобто форма мікрооб'єкта визначається деякою множиною координат x_i, y_i , де $n=1, 2, \dots, m$.

Характеристика форми та розмірів елементів мікроструктури проводиться, як правило, через визначення показників площі поверхні контурів, їх периметра, еквівалентних діаметрів [1]. Кількісну оцінку форми мікрооб'єктів отримують Фур'є-аналізом їх контурів. Для проведення останнього необхідно передати контурні точки з РЕМ на ЕОМ (певну множину координат x_i, y_i).

Потім виконується розкладання в ряд Фур'є:

$$R(\theta) = R_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos \theta + B_n \sin \theta), \quad (1)$$

де R_0 – середній радіус, A_n, B_n, R_i – амплітуди та гармоніки Фур'є-розкладу.

За інтегральними формулами (1) обчислюються площі і моменти:

$$\begin{aligned} S_j &= \int_{x_j}^{x_{j+1}} \int_0^{y_j} dx dy = \frac{(y_{j+1} + y_j)(x_j - x_{j+1})}{2}; & S &= \sum_{j=1}^m S_j; \\ M_x &= - \int_{x_j}^{x_{j+1}} \int_{x_j}^{x_{j+1}} x dx dy = \frac{(x_{j+1}^2 + x_j x_{j+1} + x_j^2)(y_j + y_{j+1})}{2}; & M_x &= \sum_{j=1}^m M_{xj}; \\ M_y &= - \int_{x_j}^{x_{j+1}} \int_{x_j}^{x_{j+1}} y dx dy = \frac{(y_{j+1}^2 + y_j y_{j+1} + y_j^2)(x_j - x_{j+1})}{2}; & M_y &= \sum_{j=1}^m M_{yj}; \end{aligned} \quad (2)$$

Тоді $x = M_x/S$, $y = M_y/S$. Визначивши в декартових координатах периметр $P = \sum_{j=1}^m P_j$, де $P_j = \left[(x_{j+1} - x_j)^2 + (y_{j+1} - y_j)^2 \right]^{1/2}$, здійснюємо перехід до полярних координат:

$$R_j = \left[(y_j - y)^2 + (x_j - x)^2 \right]^{1/2}, \quad \Theta_j = \arctg \frac{y_j - y}{x_j - x}.$$

Гармоніки Фур'є-розкладу та коефіцієнти P_i обчислюються за відомими алгоритмами, розглянутими у [11, 12]:

$$\begin{aligned} P_n &= \frac{1}{R_0} \left(\frac{A_n^2 + B_n^2}{2} \right); & P_1 &= P_{1-10} = \left(\frac{\sum_{j=1}^{10} P_j}{2} \right)^{1/2}; & P_2 &= P_{11-20} = \left(\frac{\sum_{j=11}^{20} P_j}{2} \right)^{1/2}; \\ P_3 &= P_{21-30} = \left(\frac{\sum_{j=21}^{30} P_j}{2} \right)^{1/2}; & P_4 &= P_{31-40} = \left(\frac{\sum_{j=31}^{40} P_j}{2} \right)^{1/2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Обчислення коефіцієнтів P_i дає можливість визначати внесок кожного члена ряду у

функцію форми, тобто за їх допомогою відображається фізичний і морфологічний зміст кожної гармоніки. Крім форми, при кількісному стереологічному аналізі РЕМ-зображення у пакеті «Stiman», визначається низка інших параметрів мікоморфології: число часток, загальний периметр, загальна площа, середній периметр, середня площа, середній коефіцієнт складності форми і фактор форми.

Застосування рядів Фур'є робить ілюстративним аналіз стосовно опису мікроструктурних часток, але ця методика вимагає значного комп'ютерного часу для обчислень тригонометричних функцій. Цього недоліку позбавлена система ортогональних функцій Уолша, яка сьогодні широко використовується в комунікаційній теорії.

Нехай функція $F(x)$ представляється розкладанням у ряд з ортонормованого базису функцій $\{f(j, x)\}$: $F(x) = \sum_{j=0}^{\infty} a(j)f(j, x)$, де коефіцієнти $a(j)$ визначаються

виразом: $a(j) = \int_{-x}^x F(x)f(j, x)dx$; $[-x, x]$ – інтервал ортогональності. У випадку функцій

Уолша $\int_{-x}^x F(x)f(j, x)$ можна перетворити в суму інтегралів виду $\left[+ \int F(x)dx \right]$ на тій

частині інтервалу, де функції Уолша $f(j, x)$ набувають значення $+1$ і вигляду $\left[- \int F(x)dx \right]$ в частині інтервалу, де це значення дорівнює -1 . Це дозволяє істотно зменшити час обчислень.

Виконані порівняльні дослідження підтвердили ефективність такого використання функцій Уолша в комп'ютерно-прикладному аналізі форми окремих часток. Наприклад, час, затрачений на обчислення 10-ти гармонік Фур'є, відповідає часу одержання 600 коефіцієнтів Уолша.

Дамо оцінку точності стереологічних вимірів для випадку растрової розгортки. Кількісна інформація при такій розгортці зчитується в дискретних точках з постійним кроком уздовж рядів і між рядами. Ця інформація аналогічна отриманій з фіксованого РЕМ-зображення у вузлах деякої квадратної чи прямокутної сітки. Для оцінки точності скористаємося відомою в теорії геометричної імовірності задачею покриття плоских ґраток [2].

У цій задачі використовується ймовірнісний розподіл кількості точок ґратки, що попадають у деяку геометричну фігуру (наприклад, квадрат), розташування якої на площині випадкове.

Припустимо, що на деякий контур накладена регулярна сітка точок. При її розміщенні кількість точок у межах контуру буде змінюватися, але початкова кількість точок буде повторюватися щораз, коли сітка буде зміщена так, що нові її точки в точності збігаються з положенням попередніх. Це означає, що число точок у межах контуру є періодичною функцією, яку можна розкласти в ряд Фур'є [4, 9].

При використанні прямокутних сіток і комплексної форми запису рядів Фур'є коефіцієнти ряду будуть рівними:

$$C_{k_1 k_2} = \iint_S \exp[-2\pi i(k_1 x/a + k_2 y/b)] dx dy, \quad (4)$$

де s – площа контуру; k_1, k_2 – цілі числа; a, b – дискретність вузлів сітки уздовж X і Y осей.

На основі теореми Парсеваля про середнє значення квадрата функції, розкладеної в ряд Фур'є, відомо, що дисперсія σ^2 цієї функції дорівнює сумі квадратів модулів коефіцієнтів $C_{k_1 k_2}$, розрахованих при значеннях k_1, k_2 від $-\infty$ до $+\infty$, окрім $k_1 = k_2 = 0$:

$$\sigma_g^2 = \sum_{k_1, k_2 = -\infty}^{\infty} |C_k|^2. \quad (5)$$

Допустимо, що лінії растрової сітки паралельні осі «X». Розділимо паралельно осі «Y» контур S зображення на h однакових смужок шириною L . Тоді після розрахунку коефіцієнтів за формулою (4) і знаходження суми квадратів їх модулів одержуємо вираз, що залежить від величини $g(1-g) = Q$.

Величини g – дробові частки чисел, що завжди задовольняють умову $0 \leq g \leq 1$. Для прямокутної сітки на основі формули Пуассона одержуємо:

$$Q = g(1-g) = 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \pi k g}{(\pi k)}. \quad (6)$$

Очевидно, $0 \leq g \leq 1$, значить, $0 \leq g < 1/4$, відповідно середнє інтегральне \bar{Q} дорівнює $1/6$. Вважаючи, що $Q = \bar{Q}$ і виразивши число смужок n на підставі задачі Бюффона через периметр контуру $p = \pi n L$, одержимо:

$$\sigma_S^2 = \frac{b^2 L P}{6\pi}. \quad (7)$$

У таблиці 1 приведені результати оцінки точності вимірювання площі складного контуру при $S = 6.25 \text{ мм}^2$ і $P = 12 \text{ мм}$ у масштабі РТV-мікрофотографії.

Таблиця 1. Точність стереологічних вимірів у плані

Кількість ліній растра (N)	128	256	512
Густота растра (b)	0,781	0,390	0,195
σ_S , %	8,76	3,09	1,08

З розрахунків випливає, що точність вимірів істотно залежить від кількості ліній розкладання при растровій розгортці, дещо менше – від форми і розмірів вимірюваних ділянок, а також їх орієнтації щодо ліній растрової розгортки.

Висновки. Застосування рядів Фур'є робить ілюстративним аналіз у відношенні опису мікроструктурних часток, але ця методика вимагає значного комп'ютерного часу для обчислень тригонометричних функцій. Даного недоліку позбавлена система ортогональних функцій Уолша, яка сьогодні широко використовується в комунікаційній теорії.

Робота виконана за підтримки МОН України (держреєстраційний номер теми № 0112U000290).

1. Березин Н. П. Разрешающая способность: история, состояние и развитие [Текст] / Н. П. Березин, В. Н. Кононов // ОМП, 1991. – №11.
2. Кендалл М., Моран П. Геометрические вероятности [Текст] / М. Кендалл, П. Моран. - М.: Наука, 1972. – 192 с.
3. Мельник В. Н. Некоторые вопросы цифровой обработки РЭМ-изображений [Текст] / В. Н. Мельник, В. А. Михайлюк // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 1993. - №4. - С. 73-82.
4. Мельник В. М. Теорія і практика фотограмметричних методів в електронно-мікроскопічних дослідженнях [Текст]: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук. : спец. 05.24.01 «Геодезія, фотограмметрія і картографія» / Мельник Володимир Миколайович ; Державний університет «Львівська політехніка» - Львів, 1995.- 51 с.
5. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография [Текст]. - М.: Металлургия, 1970. - 375 с.
6. Харалик Р.М. Статистический и структурный подходы к описанию текстур [Текст] // ТИИЭР, 1979. - Т.67, №5. - С. 98-120.
7. Чернявский К.С. Стереология в металловедении [Текст]. - М.: Металлургия, 1977. - 384с.
8. Шостак А. В. Методи і моделі мікрофотограмметрії у прикладних наукових дослідженнях [Текст]: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 05.24.01 «Геодезія, фотограмметрія і картографія» / Шостак Анна Володимирівна ; Київський національний університет будівництва і архітектури. – Київ, 2012. – 28 с.

9. Luhmann. Close range photogrammetry for industrial applications [Text] / Luhmann, Thomas // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. - 2010 - Vol. 64/3, pp. 558-569.
10. Sergeev V. Quantitative morphological analysis in a SEM-microcomputer system - J. Quantitative shape analysis of single objects [Text] / V. Sergeev, V. Sokolov // J. of microscopy, 1984, - V.135- -Pt.1.-P.1-12.
11. Shah G. Quantitative characterization of abrasive surfaces using a new profile measuring system [Text] / G. Shah, A. Bell, S. Malkin // Wear, 1977. -V.41.- №2. -P.315-.
12. Serra J. Image Analysis and Mathematical Morphology [Text]. – London: Academic Press., 1992. – P. 329-341.

Стаття надійшла до редакції 27.04.2013.