



## РЕМ-ФОТОГРАМЕТРИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ МІКРОРЕЛЬЄФУ ПОВЕРХОНЬ

Анализируются цифровые модели рельефа типовых механически сформированных поверхностей. Приведены алгоритмы и примеры аналитической фотограмметрической и цифровой обработки РЭМ-стереоизображений.

The digital relief models of standard mechanically formed surfaces are considered in the paper. The algorithms of analytical photogrammetric and digital processing of SEM stereoisimages are given with appropriate examples.

**Вступ.** Растрові електронні мікроскопи (РЕМ) широко використовуються для вивчення мікрогеометрії поверхонь, але одержання кількісної інформації про мікрорельєф у мікронних та субмікронних діапазонах пов'язано з великими труднощами. Саме тому в більшості випадків дослідження проводять монокулярно, обмежуючись якісними показниками. Коли досліджуваний мікрооб'єкт складається з елементів простої геометричної форми (багатогранників, площин, сфер і т. д.), такий метод дозволяє досліднику уявити його просторову структуру. Якщо ж об'єкт складний і до того ж невідома його просторова структура, то на основі одних монокулярних спостережень просто неможливо правильно інтерпретувати просторову організацію мікроструктури. Тому й виникла потреба в розробленні таких методів, які дозволяли б проводити тривимірне відновлення (реконструкцію) мікрооб'єктів.

**Аналіз сучасних досліджень.** Сьогодні в багатьох галузях науки і техніки (матеріалознавство, біологія, медицина тощо) з великим успіхом використовується растрова електронна мікроскопія, яка дає змогу на мікронному та субмікронному рівнях досліджувати (оцінювати) мікрорельєф поверхонь, їхні особливості та характеристики. Мікрорельєф є тривимірним об'єктом з певною просторовою організацією і мікроструктурою. Структуру мікрооб'єкта можна розглядати як результат просторової кореляції в розміщенні окремих нерівностей, оскільки вона є детермінованою або випадковою, ізотропною або анізотропною. Повний опис цифрової моделі мікрорельєфу (ЦММР) як фізичного поля передбачає аналітичну інтерпретацію результатів розподілу функції  $z(x, y)$  та її перших і других похідних для будь-якої кінцевої множини точок. Щоб одержати цей розподіл, необхідно провести складні обчислення, тому в більшості відомих нам публікацій [1-4] при аналізі випадкових полів користуються одномірними законами розподілу. Побудова або реконструкція цифрової моделі мікрорельєфу – це задача реконструкції тривимірного об'єкта за двовимірним РЕМ-зображенням, яка належить до некоректних і характеризується певними труднощами розв'язку [12].

Питанню реконструкції тривимірного об'єкта за двовимірним РЕМ-зображенням присвячено дуже мало публікацій [7,9], тому пропонується дослідження є важливим та актуальним.

**Виклад основного матеріалу. Мета дослідження** – теоретично проаналізувати мікрорельєф типових механічно оброблених поверхонь; розробити алгоритми аналітичного та цифрового опрацювання РЕМ-стереозображень.

### 1. Теоретичне моделювання ЦММР

Тривимірне (3D) оцінювання мікрорельєфу провести непросте. Це питання висвітлено в працях [5,11].

Розглянемо деякі теоретичні питання 3D-моделювання типових "ідеальних" поверхонь, отриманих, наприклад, при штучному вирощуванні монокристалів, формуванні регулярного мікрорельєфу матеріалів тощо. Як приклад візьмемо найбільш типові механічно оброблені мікрорельєфні поверхні: східчасту, сферичну та циліндричну.

**Східчаста поверхня** – це типовий приклад поверхні руйнування. Щоб оцінити, наскільки ЦММР східчастих поверхонь взагалі підходить для дослідження довільних поверхонь руйнування, скористаємося відомим у профілометрії поверхні руйнування положенням, що "поверхні руйнування з однаковими показниками шорсткості мають приблизно однакові середні показники профілів шорсткості" [12]. Для "ідеальної" (мал. 1) східчастої поверхні руйнування у праці [13] наводиться загальне співвідношення між середніми показниками профілю шорсткості ( $\bar{K}_p$ ) і відповідними показниками шорсткості окремих ділянок ( $\bar{K}_A$ ):

$$\frac{1}{\bar{K}_p} = \frac{4}{\pi} \left[ \frac{1}{K_A} - \frac{(2-K_A)}{3K_A^2} + \frac{(2-K_A)^2}{5K_A^3} - \frac{(2-K_A)^3}{7K_A^4} + \dots \right]. \quad (1)$$

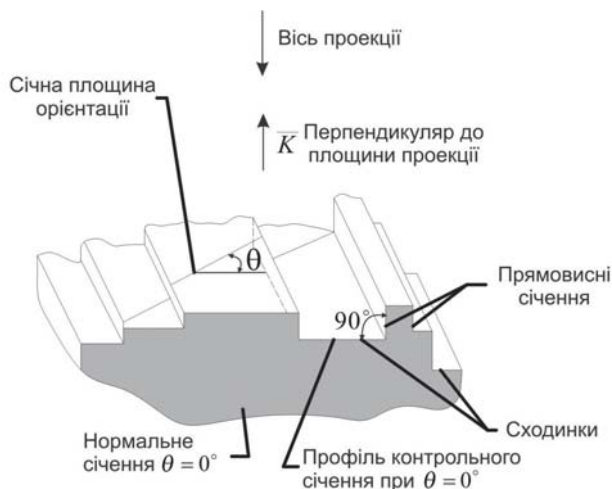
Якщо записати рівняння (1) у вигляді скінченного ряду, то після нескладних перетворень отримаємо:

$$\frac{1}{\bar{K}_p} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n (2-K_A)^n}{(2n+1)K_A^{n+1}}. \quad (2)$$

Аналізуючи одержаний вираз, можна виявити, що коли  $\bar{K}_A=2$  (а це відповідає поверхні з довільною кривиною), то розподіл орієнтації елементів поверхні й локальна кривина окремих ділянок поверхні руйнування не впливає на однозначність кореляції між  $\bar{K}_A$  і  $\bar{K}_p$ . Цей результат можна тлумачити так: якщо вважати перший член у рівнянні (2) таким, що враховує хаотичність рельєфу поверхні, то члени вищого порядку можна розглядати як поправки на відхилення аналізованої поверхні від повністю довільної поверхні руйнування.



Але і при  $\bar{K}_A=1$  (що відповідає випадку "ідеальної плоскої поверхні руйнування")  $\bar{K}_P=2$ .



Мал. 1. "Ідеальна" 3D-східчаста поверхня крихкого руйнування

**Сферична поверхня.** При проектуванні напівсферичної "ідеальної" поверхні на основу показник шорсткості  $\bar{K}_A$  для довільного нормального січення  $ABCE$  становитиме  $\bar{K}_A=2$  (мал. 2).

Тоді

$$\bar{K}_P(\theta) = \frac{ABC(\theta)}{AEC(\theta)} = \frac{\pi r \sin \theta}{2r \sin \theta} = \frac{\pi}{2}, \quad (3)$$

а у випадку орієнтацій січної поверхні в межах  $0 \leq \theta \leq \pi/2$  середньоінтегральне значення  $\bar{K}_P = \int_0^{\pi/2} K_P(\theta) \rho(\theta) d\theta$ .

Коли  $\rho(\theta) d\theta = \frac{d\theta}{(\pi/2)}$ , то для напівсфери  $\bar{K}_P = \pi/2$ .

Порівнявши у виразі (1) співвідношення між середнім показником профілю шорсткості й відповідним показником шорсткості ділянки для "ідеальної" східчастої поверхні та відповідні значення  $\bar{K}_A$  і  $\bar{K}_P$  для напівсферичної поверхні, можна стверджувати, що поверхня руйнування з довільною кривиною та східчаста поверхня є статично еквівалентними на глобальному рівні, хоча локально вони можуть бути зовсім різними.

**Циліндрична поверхня.** Для напівциліндричної поверхні

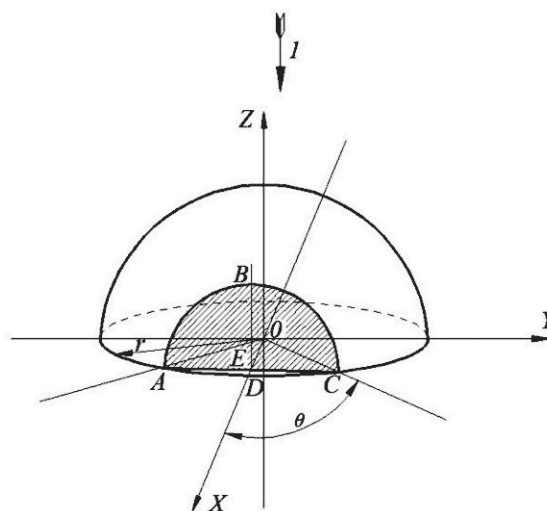
$$\bar{K}_A = \frac{\pi l}{2rl} = \frac{\pi}{2}. \quad (4)$$

Для нормального січення, на відміну від сферичної поверхні, де достатньо було б паралельного переміщення, ми повинні рандомізувати його відносно кута орієнтації  $\theta$  (мал. 3). З цього випливає, що

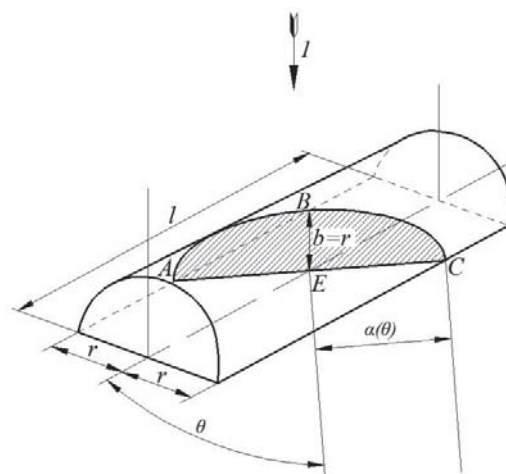
$$\bar{K}_P(\theta) = \frac{ABC(\theta)}{AEC(\theta)}. \quad (5)$$

Здійснюючи усереднення по всіх січеннях  $0 \leq \theta \leq \pi/2$  і використовуючи рівняння  $\rho(\theta) d\theta = 2/\pi d\theta$ , отримуємо:

$$\bar{K}_P = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - \sin^2 \theta \sin^2 \psi} d\theta d\psi. \quad (6)$$



Мал. 2. Відображення напівсферичної поверхні руйнування: 1 – вісь проекції з паралельним променем



Мал. 3. Профілометричний аналіз кругового напівциліндра: 1 – вісь проекції з паралельним променем

Це подвійний еліптичний інтеграл другого типу, який можна вирахувати або цифровим способом, або методом розкладання внутрішнього інтегралу на нескінченні ряди. Проінтегрувавши вираз (6), отримаємо наступне рівняння:

$$\begin{aligned} & \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - \sin^2 \theta \sin^2 \psi} d\theta d\psi = \\ & = \frac{\pi}{2} \left\{ 1 - \left( \frac{1}{2} \right)^2 \sin^2 \theta - \left( \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4} \right)^2 \frac{\sin^4 \theta}{3} - \right. \\ & \quad \left. - \left( \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6} \right)^2 \frac{\sin^6 \theta}{5} - \dots \right\}. \end{aligned} \quad (7)$$

Інтеграл у рівнянні (7) сходиться досить швидко і дає результат:

$$\bar{K}_P = 1,33725.$$

Для порівняння зі ступінчастою поверхнею підставляємо значення  $\bar{K}_A$  із рівняння (4) у рівняння (2) і отримуємо значення  $\bar{K}_P=1,33874$ , що лише на



0,1 % більше, ніж значення знайденого нами інтегралу.

Порівняння показників проєктованих площ і проєктованого профілю наведених вище поверхонь при теоретичному калібруванні подано у таблиці.

**Порівняння показників проєктованої площі та проєктованого профілю різних поверхонь при теоретичному калібруванні**

Поверхня	$\bar{K}_A$	$\bar{K}_P$	$\bar{K}_P$ за форм. (2)	Відсоток відхилен- ня від форм. (2)	Відсоток середньої похибки для поверхонь
Ступінчастий злом	1; 2	18	18	0	2 для сер. арифм. 3 для сер. гармон.
Сферична	2	$\pi/2$	$\pi/2$	0	
Циліндрична	$\pi/2$	1,33725	1,33874	0,111	

Результати числового інтегрування для різних поверхонь узгоджуються із типовою "східчастою" поверхнею. Значення  $\bar{K}_A$  і  $\bar{K}_P$ , які важливі для фрактографії, не перевищують 2-3 %, що практично несуттєво.

## 2. Побудова ЦММР методами аналітичної фотограмметрії та дискретного перетворення Фур'є (ДПФ)

Аналітичне опрацювання РЕМ-стереозображень передбачає використання приладів стереокомпараторного типу або цифрових фотограмметричних станцій типу "Дельта".

Нехай мікрорельєф відображено цифровою моделлю рельєфу (ЦМР) на регулярній сітці, тобто його представлено дискретно матрицею висот розміром  $M \times N$ . Тоді пряме перетворення Фур'є матиме такий вигляд:

$$G_{n,m} = \sum_{l=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} Z_{k,l} W_N^{-n,k} W_M^{-m,l}, \quad n=0,1,\dots,N-1; \quad m=0,1,\dots,M-1, \quad (8)$$

а обернене –

$$Z_{k,l} = \frac{1}{NM} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} G_{n,m} W_N^{n,k} W_M^{m,l}, \quad k=0,1,\dots,N-1; \quad l=0,1,\dots,M-1. \quad (9)$$

Алгоритм виконання двовимірного ДПФ базується на послідовному виконанні одновимірного перетворення Фур'є: спочатку в одному напрямі, наприклад,  $x$ , а потім у другому, наприклад,  $y$ . Тоді рівняння (8) можна подати так:

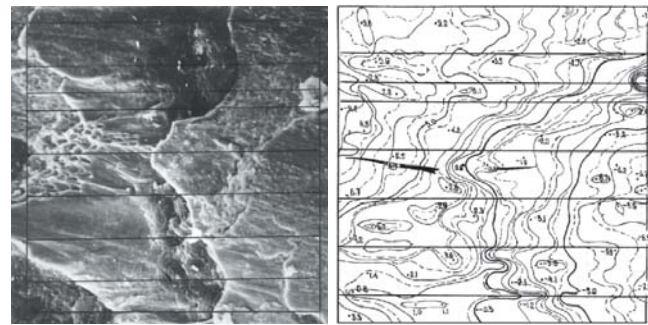
$$G_{n,m} = \sum_{l=0}^{M-1} Q_l W_M^{-m,l}, \quad (10)$$

$$\text{де } Q_l = \sum_{k=0}^{N-1} Z_{n,l} W_N^{k,l} W_N^{-n,k}.$$

Коефіцієнти  $G_{n,m}$  (включаючи дійсну та уявну складові) по порядку їх індексів  $n$  та  $m$  – це і є просторово-частотне відображення рельєфу. При

цьому модуль комплексних коефіцієнтів двовимірного ДПФ характеризує спектральну потужність досліджуваної ЦММР, яка визначається як  $|G_{n,m}|$  і являє собою розподіл амплітуд гармонік за частотами.

Приклад побудови ЦММР за цим методом показано на мал. 4 і 5. Мікрофотографію крихкого руйнування (мал. 4) отримано на РЕМ Hitachi S-800 (МДУ, Москва). Карту ізоліній (мал. 5) викреслено з допомогою ЦФС "Дельта" (м. Вінниця). Аналітичне фотограмметричне оброблення здійснено за ПП "МІКРО".



Мал. 4. Мікрофотографія крихкого руйнування (збільшення 1000х)

Мал. 5. Ізолінійна карта ЦММР крихкого руйнування

## 3. Побудова ЦММР методами цифрової РЕМ-стереометрії

Цифрове оброблення РЕМ-зображень включає такі операції [6, 8, 10].

1. Введення зображення.
2. Попереднє оброблення зображень.
3. Стереолого-планіметричний аналіз.
4. Стереометричний аналіз.

У літературі немає однозначності стосовно РЕМ-стереометрії, тому детальніше спинимось саме на цьому етапі цифрового оброблення РЕМ-зображень.

Основні співвідношення цифрової РЕМ-стереометрії.

Позначимо систему координат лівого знімка ( $CK_r$ )  $OX_1X_2X_3$ , помістивши центр  $O$  у точку суміжності чотирьох центральних пікселів і направивши осі  $OX_1$  та  $OX_2$  паралельно осям зростання  $i$  та  $j$  відповідно. Нехай  $d$  – розмір сторони пікселя (у мікронах або ангстремах). Тоді центр пікселя з двовимірною адресою  $(i, j)$  матиме такі координати:

$$x_1 = \left(i - \frac{M-1}{2}\right)d; \quad x_2 = \left(j - \frac{N-1}{2}\right)d. \quad (11)$$

Праве зображення отримується після повороту досліджуваного зразка на поворотному столику. Цей поворот може складатися з двох етапів: необов'язкового – поворот навколо вертикальної осі (в ідеалі збігається з третьою віссю  $CK_r$ ) на кут  $\omega$  і обов'язкового повороту – навколо осі  $OX_1$  на кут  $\theta$ . Систему координат, що утвориться з  $CK_r$  у результаті цих двох поворотів, позначимо індексом





$S(CK_S)$ . Матрицю перетворення координат при переході від  $CK_S$  і  $CK_r$  позначимо символом  $C_r^S$ . Нехай

$$\Phi = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}; \quad E = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Якби поворотний столик працював ідеально, тоді точка досліджуваної поверхні, що характеризується в  $CK_r$  вектором  $\vec{X}$ , перейшла б у точку, яка характеризується в тій же системі координат вектором  $C_r^S \vec{X}$ . Спостережуваний при цьому зсув компонентів  $x_1$  та  $x_2$  відповідав би вектору  $\vec{Z} = \Phi C_r^S \vec{X} - \Phi \vec{X} = \Phi (C_r^S - E) \vec{X}$ . Насправді поворотний столик має додатковий зсув  $\Delta \vec{X}$  і, крім того, реальна орієнтація третьої осі системи координат, зв'язаної з поворотним столиком, не збігається з орієнтацією осі РЕМ (третьої осі  $CK_r$ ).

Уведемо систему координат  $V(CK_V)$ , зв'язану з поворотним столиком. Вважатимемо, що перехід від  $CK_r$  до  $CK_V$  здійснюється в результаті двох малих поворотів на кути  $\varepsilon$  і  $\xi$  навколо першої та другої осей, тобто матриця перетворення координат  $C_r^V$  має вигляд:

$$C_r^V = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varepsilon & \sin \varepsilon \\ 0 & \sin \varepsilon & \cos \varepsilon \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \xi & 0 & -\sin \xi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \xi & 0 & \cos \xi \end{pmatrix}, \quad (13)$$

а матриця перетворення координат  $C_V^S$  така:

$$C_V^S = \begin{pmatrix} \cos \omega & \sin \omega & 0 \\ -\sin \omega & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Спостережуваний зсув компонентів  $x_1$  та  $x_2$  з урахуванням зміщення  $\Delta \vec{X}$  і неузгодженості в орієнтації  $CK_r$  і  $CK_V$  виражається вектором

$$\vec{Z} = \Phi C_r^V [(C_V^S - E) C_r^r \vec{X} + \Delta \vec{X}]. \quad (15)$$

Припустимо, що елементу лівого зображення  $x$  із двовимірною адресою  $(i, j)$  відповідає образ правого знімка  $\tilde{x} = str(x)$ , двовимірна адреса якого  $(\tilde{i}, \tilde{j})$ . Тоді компоненти  $\vec{Z}$  виглядатимуть так:

$$Z_1 = (\tilde{i} - i)d; \quad Z_2 = (\tilde{j} - j)d. \quad (16)$$

Рівняння в частках пікселя матиме вигляд:

$$\begin{bmatrix} \tilde{i} - i \\ \tilde{j} - j \end{bmatrix} = \Phi C_r^V (C_V^S - E) C_r^r \begin{bmatrix} i - (M-1)/2 - \Delta i \\ j - (N-1)/2 - \Delta j \\ l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \tilde{i} \\ \Delta \tilde{j} \end{bmatrix}, \quad (17)$$

де  $\Delta i$  та  $\Delta j$  – зсув відносно центра відстежуваного пікселя;  $\Delta \tilde{i}$ ,  $\Delta \tilde{j}$  – компенсаційні зміщення;  $l$  – відносна висота досліджуваної поверхні в пікселях.

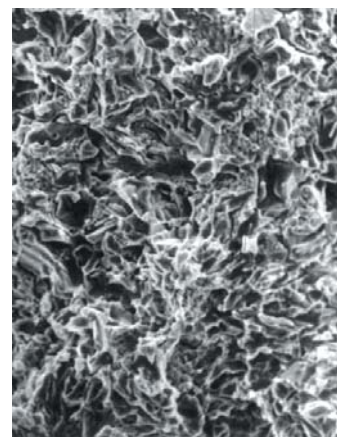
Прийmemo, що  $\varepsilon = \xi = \omega = 0$ ;  $\Delta i = \Delta j = \Delta \tilde{i} = \Delta \tilde{j} = 0$ . Тоді  $i - \tilde{i} = 0$ ;  $j - \tilde{j} = [j - (N-1)/2](\cos \theta - 1) + l \sin \theta$ .

Звідки

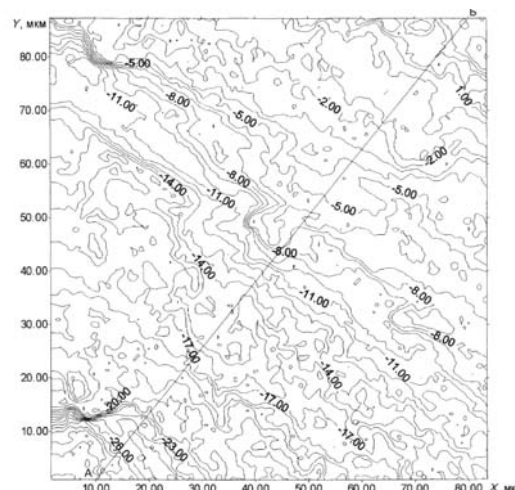
$$l = \frac{\tilde{j} - j + (1 - \cos \theta)[j - (N-1)/2]}{\sin \theta}. \quad (18)$$

Практична реалізація цифрового оброблення РЕМ-стереозображень здійснювалася за ПП "СТЕРЕКОН", розробленого під керівництвом проф. В. М. Соколова (МДУ, Москва).

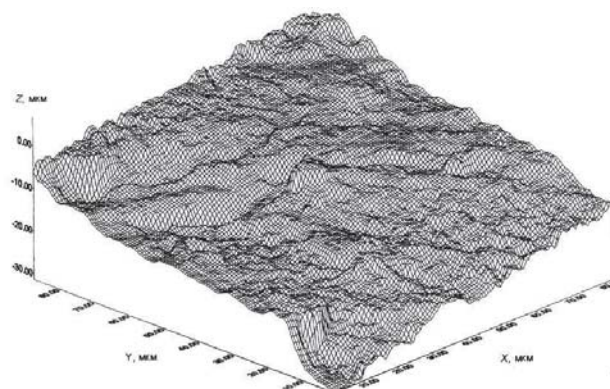
На мал. 6-9 відображено результати практичного застосування цифрового стереометричного оброблення РЕМ-стереозображення зразка чавунної пластини.



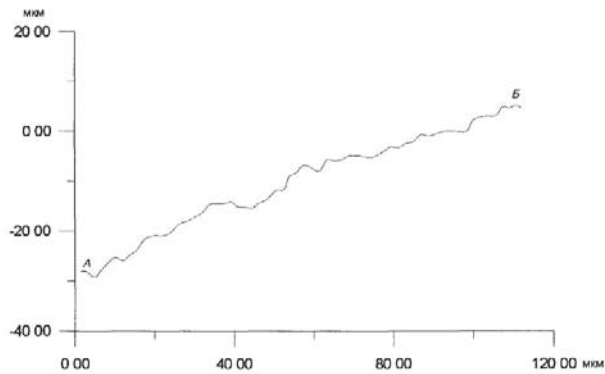
Мал. 6. РЕМ-мікрофотографія чавунного зразка (збільшення 1000 $\times$ )



Мал. 7. Карта ізоліній мікрорельєфу поверхні злому (збільшення 1000 $\times$ )



Мал. 8. Тривимірний блок-діаграма ділянки поверхні злому (збільшення 1000 $\times$ )



Мал. 9. Профіль мікрорельєфу вздовж лінії А-Б  
(збільшення 1000×)

**Висновки.** Кількісні методи растрової електронної мікроскопії можна успішно застосовувати до реалізації задач, для яких кількісний аналіз зображень тонкої структури або рельєфу поверхні із застосуванням стереовимірювань є найбільш доцільним, а в ряді випадків і основним.

Методи цифрових моделей мікрооб'єктів можуть бути основою фотограмметричного забезпечення тривимірної реконструкції електронно-мікроскопічних зображень.

#### Література

1. *Вентцель, Е.С.* Теория вероятностей [Текст] / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 2001. – 575 с.
2. *Гаврилова, О.* Метод аппроксимации автокорреляционных функций для описания площадных объектов фотоизображения [Текст] / О. Гаврилова // Изв. вузов. Геодез. и аэрофотосъем. – 1984. – № 2. – С. 68-72.
3. *Дженкинс, Г.* Спектральный анализ и его приложения [Текст] / Г. Дженкинс, Д. Ваттс. – М.: Мир, 1972. –

Вып. 11. – 287 с.

4. *Отнес, Р.* Прикладной анализ временных рядов [Текст] / Р. Отнес, Л. Эноксон. – М.: Мир, 1982. – 418 с.

5. *Иванова, В.С.* Количественная фрактография [Текст] / В.С. Иванова, А. Шанявский // Усталостное разрушение. – Челябинск: Metallurgy, 1988. – 400 с.

6. *Мельник, В.М.* Кількісна стереомікрофрактографія: монографія [Текст] / В.М. Мельник, А.В. Шостак. – Луцьк, 2010. – 457 с.

7. *Соколов, В.Н.* Метод трехмерной реконструкции микрорельефа поверхности твердых тел по их РЭМ-стереоизображениям [Текст] / В.Н. Соколов, А.А. Лебедев, В.Н. Мельник // Изв. РАН. Сер. физическая. – 1995. – № 2. – С. 28-34.

8. *Соколов, В.Н.* Использование комплекса РЭМ-микро-ЭВМ для количественного анализа поверхности и структуры микрообъектов [Текст] / В.Н. Соколов, О.В. Дементьева, А.Ю. Сасов // Поверхность. – 1982. – № 1. – С. 111-123.

9. *Степаненко, В.А.* Метод та практичне застосування стереоскопічної фрактографії [Текст] / В.А. Степаненко // Металознавство та обробка металів. – 1995. – № 1. – С. 51-54.

10. *Шостак, А.В.* Математичне моделювання шорстких поверхонь за допомогою дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) [Текст] / А.В. Шостак // Наукові нотатки: міжвуз. зб. наук. ст., напр. "Інженерна механіка". – Вип. 4. – Луцьк, 1998. – С. 67-85.

11. *Ясний, П.В.* Автоматизований аналіз поверхневих тріщин у конструкційних елементах [Текст] / П.В. Ясний, П.О. Марущак, І.В. Коваленко, Р.Т. Біщак // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – № 6. – С. 83-87.

12. *El-Saudani, S.M.* Profilometric Analysis of Fractures [Text] / S.M. El-Saudani // Metallography. – 1978. – V. 11. – № 3. – P. 247-335.

13. *Woodtli-Folprecht, J.* Morphometrical evaluation of Surface roughness during the initial fatigue stage in an austenitic Steel [Text] / J. Woodtli-Folprecht // Int. J. Fatigue. – 1984. – V. 6. – № 3. – P. 157-167.

Надійшла 06.12.10