

УДК 621.762

А. В. Шостак – кандидат технічних наук, доцент
Луцького національного технічного університету;
Ю. А. Мельник – аспірант Луцького національного
технічного університету

Визначення методами Фур'є–Хартлі мікротопографічних параметрів фрактографічних поверхонь

*Роботу виконано на кафедрі міського будівництва
та господарства ЛНТУ*

Розглянуто питання стереомікротопографії (поверхонь металів, твердих тіл). Пропонується за даними РЕМ-стереовимірювань апроксимувати цифрові моделі мікрорельєфу методами Фур'є–Хартлі з наступним визначенням крутизни, кривини, спектральної щільності.

Ключові слова: фрактографія, стереометрія, перетворення Фур'є–Хартлі, частотно-спектральна характеристика.

Шостак А. В., Мельник Ю. А. Определение методами Фурье–Хартли микротопических параметров фактографических поверхностей. Рассматриваются вопросы стереомикрофрактографии (поверхностей металлов, твердых тел). Предлагается по данным РЭМ-стереоизмерений аппроксимировать цифровые модели микрорельефа методами Фурье–Хартли с последующим определением крутизны, кривизны, спектральной плотности.

Ключевые слова: фрактография, стереометрия, преобразование Фурье–Хартли, частотно-спектральная характеристика.

Shostak A.V., Melnik Yu. A. The Estimation of Microtopographic Parametres of Fractographical Surfaces by Fourier–Hartley Mehods. The problems of stereomicrotopography (of metal surfaces, of solid body's) are considered. The approximation of microrelief digital models by Fourier–Hartley methods on the basis of REM-stereomeasurements datas (a steepness, a curvature, spectral density) are proposed.

Key words: fractography, stereometry, Fourier–Hartley transformations, frequency and spectral characteristics.

Постановка наукової проблеми та її значення. На сьогодні спостерігається зацікавленість учених-дослідників до тривимірного представлення мікротопографії поверхні як докладнішого способу опису її мікрогеометрії.

Є спроби і в нашій країні, і за рубежом [11; 13; 8] встановлення зв'язків мікротопографічних параметрів з певними, наприклад, експлуатаційними властивостями. Але частіше всього дослідження поверхні тіл проводять за допомогою профілометричних пристроїв [9]. Отримані при цьому усереднені інтегральні характеристики неадекватно відображають мікрогеометрію поверхні, тому що не фіксують нерівності, співрозмірні з розміром щупа, вимірювання проводяться вздовж лінії, а не по площі, водночас без спостереження в мікроскоп [4]. Відповідно кількісна інформація про мікротопографічні властивості, що виявляють причини і наслідки, наприклад, зношування, є наближеними.

Труднощі в процесі збору вихідної інформації і визначення вихідних параметрів, необхідних для тривимірного представлення поверхні, якоюсь мірою гальмують подальший розвиток і впровадження мікротопографічних досліджень в інженерну практику.

Для розв'язку задачі коректної кількісної характеристики мікрогеометрії фрактографічних поверхонь або поверхонь твердих тіл в загальному випадку нами пропонується виконувати 3-D реконструкції цифрових моделей мікрорельєфу (ЦММР), що вивчаються з допомогою растрових електронних мікроскопів (РЕМ) в режимі мікрофотограмметричної зйомки [6].

Аналіз останніх досліджень із цієї проблеми. Серед найрізноманітніших застосувань електронно-мікроскопічних досліджень на сьогодні найменше реалізована тривимірна реконструкція. Водночас тривимірна оцінка та відображення об'єктів на нано-мікрорівнях є надзвичайно важливою і потребує високої точності, достовірності та оперативності в режимі «on-line» [1; 3; 8; 12]. Для вирішення таких задач використовуються такі методи:

1. *Метод 3-D реконструкції за різнофокусними зображеннями.* Метод теоретично і програмно добре відпрацьований, проте має низьку точність.

2. Просторове моделювання мікрорельєфних поверхонь за допомогою комп'ютерної мікроскопії. Цей метод має суттєві обмеження, а саме – діапазон малих збільшень світлової мікроскопії.

3. Достатньо вивченим є метод нано-мікрофотограмметрії із застосуванням РЕМ-фотограмметрії [7, 8].

РЕМ-мікрофотограмметричний метод є порівняно універсальним, проте має ряд суттєвих особливостей. Основні з них – це значна невідповідність електронномікроскопічного зображення до загальноприйнятої в фотограмметрії центральної проекції; порівняно низька метрична якість РЕМ-зображення; висока зашумленість, некоректність за Адамаром 3-D реконструкції та інші. Ці питання потребують ґрунтовних теоретичних та експериментальних досліджень. Актуальність і важливість таких досліджень неодноразово зображено у низці робіт вітчизняних і зарубіжних авторів, а також в рішеннях щорічних конференцій та конгресів з електронної мікроскопії та фотограмметрії.

ЦММР має певну просторову організацію і мікроструктуру. Тому повний опис цифрової моделі рельєфу як фізичного поля передбачає аналітичну інтерпретацію ЦММР і одержання функції спільного розподілу функції $Z = (x, y)$ [10, 9] та її перших і других похідних для будь-якої скінченної множини точок. Проте побудова або 3-D реконструкція – це задача відображення тривимірного об'єкта за двовимірними зображеннями і з тієї причини є некоректною.

Мета статті – врахування цього утруднення із застосуванням для побудови ЦММР методів Фур'є-Хартлі з визначенням таких важливих мікротопографічних характеристик мікроповерхонь, як крутизна, кривина, АКФ, спектральна щільність, передавальних функцій та ін.

Виклад основного матеріалу та обґрунтування отриманих результатів дослідження.

1. Побудова ЦММР методом Хартлі. Перетворення Хартлі, як і добре відоме перетворення Фур'є, застосовується для цифрової обробки інформації, спектрального аналізу, фільтрації, інтерполяції та інше.

Ґрунтуючись на роботах [2, 11], дамо коротке визначення перетворення Хартлі стосовно побудови ЦММР. Розглянемо z як функцію одного аргументу, тобто $z = f(x)$. Перетворенням Хартлі функції $f(x)$ називається вираз виду:

$$Hf(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cos 2\pi vx + \sin 2\pi vx \, dx. \quad (1)$$

Обернене перетворення Хартлі визначається формулою:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} Hf(v) \cos 2\pi vx + \sin 2\pi vx \, dv. \quad (2)$$

Якщо $Ff(v)$ – перетворення Фур'є функції $f(x)$, то має місце наступний зв'язок з перетворенням Хартлі:

$$Ff(v) = \frac{Y(v) + iH(v)}{1+i}, \quad (3)$$

де i – уявна одиниця.

Дискретне перетворення Хартлі $H(v)$ дійсної функції $f(x)$, де $\tau = 0, 1, \dots, N-1$, визначається як сума косинусного й синусного перетворень, тобто

$$H(v) = N^{-1} \sum_{\tau=0}^{N-1} f(x) \left[\cos \frac{2\pi v \tau}{N} + \sin \frac{2\pi v \tau}{N} \right]. \quad (4)$$

Обернене співвідношення має вигляд:

$$f(x) = \sum_{v=0}^{N-1} H(v) \left[\cos \frac{2\pi v \tau}{N} + \sin \frac{2\pi v \tau}{N} \right]. \quad (5)$$

Порівнюючи формули прямого й оберненого перетворень Хартлі, бачимо, що вони виконуються однаково на відміну від перетворення Фур'є, яке проводиться прямо і обернено за різними формулами при використанні комплексних чисел.

Найповніше в матричному вигляді дискретне перетворення Хартлі запишемо:

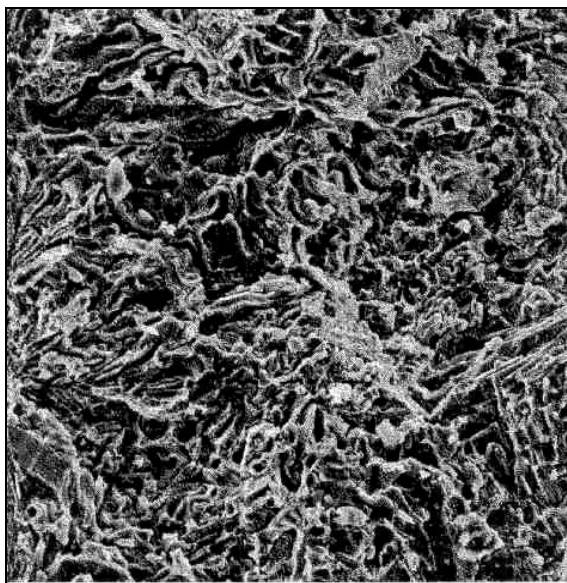


Рис. 1. РЕМ-мікрофотографія мікрорельєфу зразка. Збільшення $2000\times$

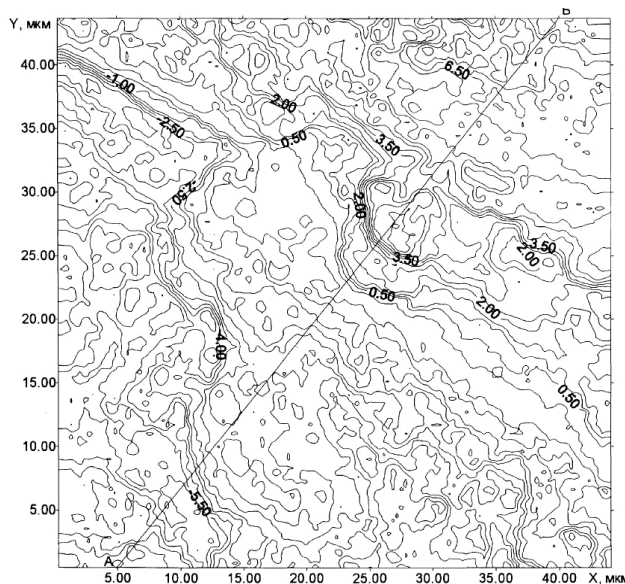


Рис. 2. Карта ізоліній поверхні чавунного злому. Збільшення $2000\times$

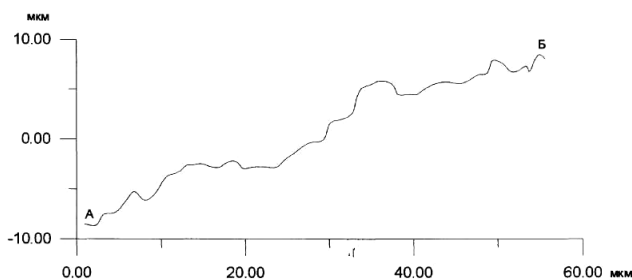


Рис. 3. Профіль мікрорельєфу поверхні ділянки вздовж лінії А–Б. Збільшення $2000\times$

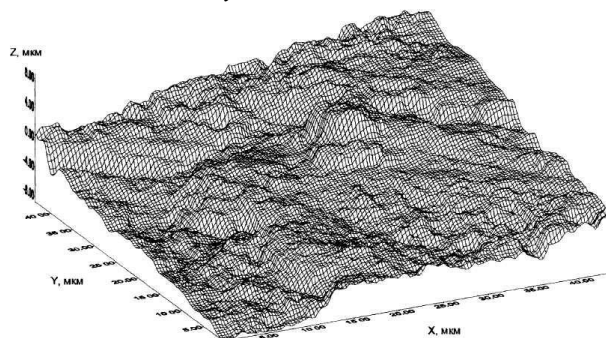


Рис. 4. Тривимірна блок-діаграма поверхні злому. Збільшення $2000\times$

2. Визначення крутизни і кривини мікроструктурних елементів ЦММР. Побудована цифрова модель мікрорельєфу служить основою для визначення мікротопографічних параметрів, що характеризують геометричні властивості локальної поверхні ЦММР у точці. Такими параметрами служать висота, крутизна і кривина.

Крутизна (ухил) і кривина в точці визначаються через перші і другі похідні функції рельєфу $Z = f(x, y)$. Похідні першого порядку $\partial z/\partial x$ і $\partial z/\partial y$ визначають крутизну в точці таким чином:

$$A = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} - \text{амплітуда й } g = \arctg\left(\frac{\partial z/\partial x}{\partial z/\partial y}\right) - \text{азимут напрямку нахилу.}$$

Кривину в точці можна визначати за строгими формулами, що не завжди доцільно, і наближеними, використовуючи матрицю, отриману із других похідних, що має назву гессіана:

$$\|B\| = \begin{vmatrix} \partial^2 Z/\partial x^2 & \partial^2 Z/\partial x\partial y \\ \partial^2 Z/\partial y\partial x & \partial^2 Z/\partial y^2 \end{vmatrix}. \quad (11)$$

Середня кривина K поверхні в якій-небудь її точці дорівнює сліду (spur) матриці $\|B\|$, тобто

$$K = spur\|B\| = \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial x^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial y^2}\right). \quad (12)$$

Для визначення похідних першого і другого порядків від $z(x, y)$ представимо поверхню Ω у вигляді сплайн-поверхні, тобто розіб'ємо область Ω на субобласті $\Delta = d_x \cdot d_y$. У кожній такій області Δ отримуємо апроксимуючу гладку аналітичну поверхню добиранням поліномів другого або третього порядків (u) [4, 13]:

$$z_u = z_u(x, y) \approx \sum_{q=0}^u \sum_{p=0}^{u-q} a_{pq} x^p y^q. \quad (13)$$

Результатом апроксимації поверхні Δ є коефіцієнти a_{pq} , що визначаються з відповідних матричних рівнянь.

Часто апроксимація виконується по підгрупах, що складається з дев'яти або 25 точок, включаючи в центрі шукану точку (k, l) .

Вирази для похідних спрощуються внаслідок вибору початку координат xu сплайн-поверхні Δ в точці (k, l) .

У таких випадках коефіцієнти a_{pq} є лінійними функціями координат дев'яти або 25 точок Z_i . Наприклад, для $u=2$ і підгрупи з дев'яти точок коефіцієнти a_{pq} дорівнюють:

$$a_{10} = \frac{\sum_{i=j-1}^{l+1} (z_{k+1,j} - z_{k-1,j})}{6d}; a_{01} = \frac{\sum_{i=k-1}^{k+1} (z_{k+1,i} - z_{k-1,i})}{6d}; c = z_{20} + a_{02} \approx \frac{1}{4d^2} \left[\sum_{\substack{i=k-1;k+1 \\ j=l-1;l+1}} (z_{i,j} - 4z_{kl}) \right]. \quad (14)$$

Коли ЦММР отримується на основі перетворення Хартлі, вказані параметри $(a_{10} a_{01} c)$ доцільно визначати за одноманітною методологічною схемою спектрального опису мікрорельєфу:

$$\mathbf{[10 a_{01} c]} = H^{-1} \mathbf{[f_{nm} \bar{f}]}, \quad (15)$$

де H^{-1} – обернене перетворення Хартлі; \bar{f} – вектор факторизації. Компонентний запис (15) такий:

$$\begin{aligned} a_{10} &= \frac{1}{v \cdot d \cdot N \cdot M} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} \mathbf{[f_{nm}]} \cdot W_N^{nk} \cdot W_M^{ml} \cdot \mathbf{[10 \bar{f}_{nm}]} \\ a_{01} &= \frac{1}{v \cdot d \cdot N \cdot M} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} \mathbf{[f_{nm}]} \cdot W_N^{nk} \cdot W_M^{ml} \cdot \mathbf{[01 \bar{f}_{nm}]} \\ c &= \frac{1}{v \cdot d \cdot N \cdot M} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} \mathbf{[f_{nm}]} \cdot W_N^{nk} \cdot W_M^{ml} \cdot \mathbf{[c \bar{f}_{nm}]} \end{aligned} \quad (16)$$

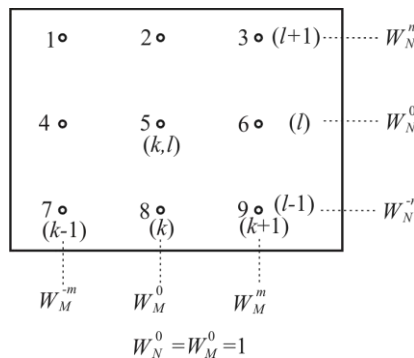


Рис. 5. До пояснення формули (16)

Для пояснення виразу (16) скористаємося рисунком 1, що пояснює методіку визначення експоненціальних множників $W = \exp(-i2\pi/N)$ (там, де цей множник відсутній, пропонується приймати $W^0 = 1$) і залежностей (16).

Наприклад:

$$a_{10} = \frac{1}{6d} \left[\left(z_{k+1,l+1} - z_{k-1,l+1} \right) \left(z_{k+1,l} - z_{k-1,l} \right) \left(z_{k+1,l-1} - z_{k-1,l-1} \right) \right] \\ = \frac{1}{6d} \left[\left(z_{k+1,l+1} \cdot W_N^n \cdot W_M^m - z_{k-1,l+1} \cdot W_N^n \cdot W_M^{-m} \right) \left(z_{k+1,l} \cdot W_N^n \cdot W_M^m - z_{k-1,l} \cdot W_N^n \cdot W_M^{-m} \right) \left(z_{k+1,l-1} \cdot W_N^n \cdot W_M^m - z_{k-1,l-1} \cdot W_N^n \cdot W_M^{-m} \right) \right] \\ + \left(z_{k+1,l-1} \cdot W_M^{-m} \cdot W_M^m - z_{k-1,l-1} \cdot W_N^{-n} \cdot W_M^{-m} \right)$$

Звідси, $f_{10} = (W_N^{-n} - W_M^{-m}) \left[(W_N^n + W_M^{-m}) \right]$.

Аналогічно $f_{01} = (W_M^m - W_M^{-m}) \left[(W_N^n + W_N^{-n}) \right]$;

$$f_c = 2 \left[(W_N^n - W_N^{-n})(W_M^m - W_M^{-m}) - (W_N^n - W_M^{-m}) - (W_M^m - W_M^{-m}) - 4 \right]$$

Узагальнена схема обчислень складається з таких етапів: 1. Перехід від цифрової моделі Z_{kl} до спектральної моделі $G_{nm} = H \mathcal{Z}_{kl}$, H – пряме перетворення Хартлі. 2. Факторизація $\bar{G}_{nm} = \mathcal{E}_{nm} \cdot \bar{f}$. 3. Обчислення вектора $\bar{a} = \left[a_{10} \dots a_{01} \right]^T$, $\bar{a} = F^{-1} \mathcal{E}_{nm}$.

3. Частотно-спектральна характеристика мікронерівностей ЦММР. У разі формування ЦММР, наприклад, в результаті механічної обробки [10], необхідні оцінки спектральної щільності і АКФ. Ці оцінки можна визначати, використовуючи одновимірне перетворення Хартлі. Вони потрібні для оцінки чистоти поверхні.

Згладжена оцінка взаємного спектру визначається за формулою [6]:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} D(\tau) R(\tau) \exp(i 2\pi \tau f) d\tau, \quad (17)$$

де f – частота, $R(\tau)$ – автокореляційна функція, D – кореляційне вікно, τ_m – довжина автокореляційної функції,

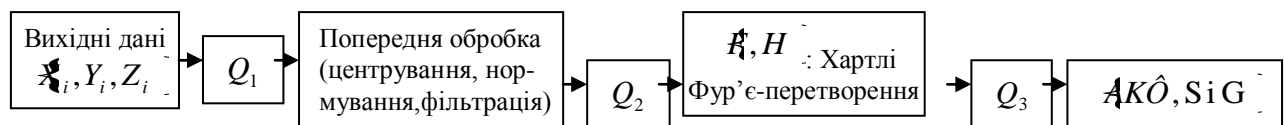
$$D = \begin{cases} 1 + \cos(\pi \tau / \tau_m) & | \tau | \leq \tau_m \\ 0 & | \tau | > \tau_m \end{cases}$$

Якщо при визначенні частотної амплітудної характеристики використовувати замість частоти f довжину хвилі λ , то вираз для коефіцієнта передачі має вигляд:

$$|G(\lambda)| = \sqrt{\frac{S_0(\lambda)}{S_i(\lambda)}}, \quad (18)$$

де S_0, S_i – щільність спектра потужності мікронерівностей на вході й на виході.

Згідно виразу (18), довжина хвилі λ мікронерівностей поверхні ріжучої кромки інструмента відтворюється на оброблювану поверхню виробу із збільшенням в $|G(\lambda)|$ раз. Якщо досягається ідеально точне відображення в профіль мікронерівностей оброблюваної поверхні цілком однаковий з профілем кромки інструмента, то $|G(\lambda)|=1$. Однак зазвичай обидва профілі не співпадають і $|G(\lambda)| \neq 1$. Усі необхідні обчислення ведуться за наведеною нижче схемою, де Q_1, Q_2, Q_3 – оператори перетворень:



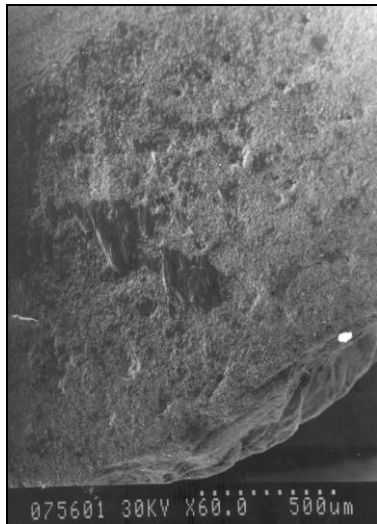


Рис. 6. Мікрофотографія ($60\times$) стану ріжучої кромки різця

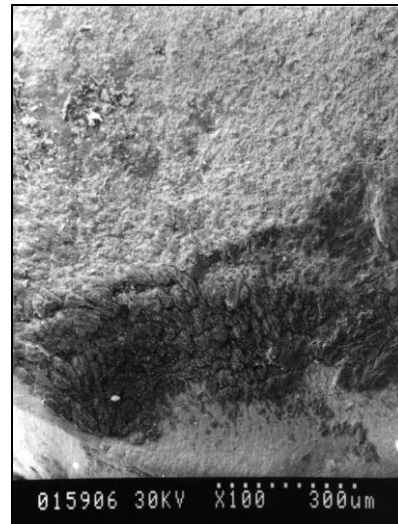


Рис. 7. Мікрофотографія ($100\times$) зони контакту оброблюваної деталі і різця

На рисунку 8 наведені величини щільності спектра мікронерівностей ріжучої кромки, щільності спектра мікронерівностей оброблюваної поверхні і коефіцієнта передачі $|G_{\lambda}|$ при обробці зі швидкістю різання $v = 5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ при глибині різання $d = 0,05 \text{ мм}$.

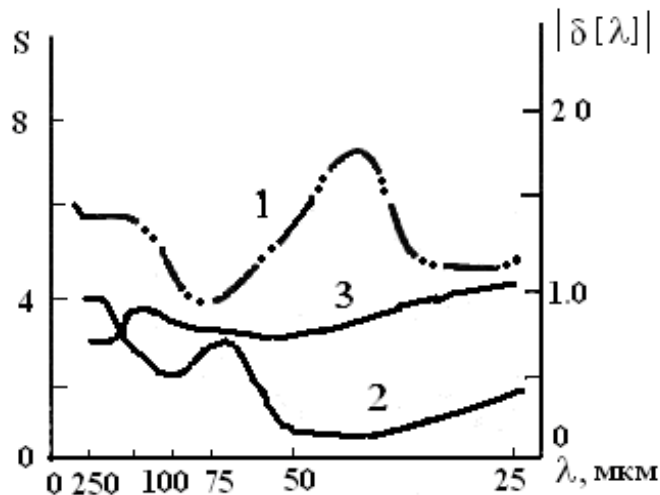


Рис. 8. Частота характеристики мікронерівностей механічно обробленої поверхні ріжучої кромки інструмента: 1) S_{λ} – спектр профілю ріжучої кромки; 2) S_{λ} – спектр профілю обробленої поверхні; 3) $|G_{\lambda}|$ – амплітудна частотна характеристика.

Висновок. Практична значимість розробленої методики суттєво залежить від використовуваної моделі 3-D реконструкції ЦММР. Розроблений метод Фур'є-Хартлі має низку переваг порівняно із загальноновизнаними поліноміальними та регресійними методами.

Список використаної літератури

1. Брэйсуэлл Р. Н. Преобразование Хартли / Брэйсуэлл Р. Н. – М. : Мир, 1990. – 175 с.
2. Брэйсуэлл Р. Н. // ТИИЭР, 1984. – Т. 72. – № 8. – С. 19.
3. Іванчук О. М. Структура і функції програмного комплексу «DIMICROS» для опрацювання РЕМ-зображень на цифровій фотограмметричній станції / О. М. Іванчук, І. Хрупіт // Сучасні дос. геод. науки та виробництва. – Вип. I(23). – 2012. – С. 193–197.
4. Корн Г. Справочник по математике / Корн Г. – М. : Наука, 1970. – 720 с.

5. Мельник В. М. Кількісна стереомікрофрактографія. Монографія / Мельник В. М., Шостак А. В. – Луцьк : Твердиня, 2010. – 457 с.
6. Мельник В. Н. Некоторые вопросы стереофрактографической обработки РЭМ-снимков / Мельник В. Н., Соколов В. Н. // Изв. РАН. Сер. : Физич., 1992. – С. 122–126.
7. Мельник В. М. Растрово-електронна стереомікрофрактографія. Монографія / Мельник В. М., Шостак А. В. – Луцьк : РВВ ВНУ ім. Лесі Українки, 2009. – 468 с.
8. Новый метод трехмерной реконструкции нано- и микрорельефа по сериям разнофокусных РЭМ-стереоизображений / Соколов В. Н., Разгулина О. В., Юрковец Д. И., Чернов М. С. // Материалы XXIII рос. конф. по РЭМ : тез. докл. – Черногловка, 2010. – С. 78.
9. Рудзит Я. А. Шероховатость поверхностей / Рудзит Я. А., Кризберг Ю. А. // Микрогеометрия и эксплуатационные свойства машин. – Зинате, 1983. – С. 55.
10. Хусу А. П. Шероховатость поверхностей: теорико-вероятностный подход / А. П. Хусу, Ю. Р. Виттенберг, В. А. Пальмов. – М. : Наука, 1975. – 343 с.
11. Чмыхов Д. В. Виртуальная лаборатория микроскопии с использованием новых методов анализа изображений / Д. В. Чмыхов // Будущее высоких технологий и инноваций за молодой Россией. – Рыбинск, 2009. – С. 37–41.
12. 3-D reconstruction of surface and Subsurface structures of Solids by SEM Stereo Images / Sokolov V. N., Yurkovets D., Melnik V., Boude A., Howell P. // Inst.Phys. conf. Dundee, 2001. – P. 168. – Section 4. – P. 109–122.
13. The IASTED International Conference on signal and image processing. / Vishnyakov G. N., Levin G. G., Loshchilov K. E., Sukhrukov K. A. // Fouriersynthsis profilometry – 2005. – С. 103–105.

Статтю подано до редколегії
22.11.2011 р.