

УДК 621.793.8, 669.268 - 631.356.4

© Ю.А. Мельник, к.т.н.; С.В. Синій, к.т.н.; М.Я. Варголяк,
Луцький національний технічний університет;
О.В. Мельник, к.т.н.,
Східноєвропейський національний університет ім. Лесі Українки;
С.Ф. Юхимчук, к.т.н.,
Луцький національний технічний університет

ЦИФРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОРЕЛЬЄФУ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ПОЛІНОМАМИ ЧЕБИШЕВА

У статті викладено математичне рішення інтерпретації результатів експериментальних досліджень поверхонь зношування та зламів деталей робочих органів сільськогосподарської техніки. При цьому, за отриманими з растрових електронних мікроскопів експериментальними даними топографії поверхонь руйнування здійснюється моделювання цифрової моделі мікрорельєфу деталей шляхом апроксимування за ортогональними поліномами Чебишева. Отримані результати призначені для зменшення зношування та зламів деталей, підвищення надійності і ефективності металевих робочих органів та виконуваних ними технологічних процесів.

**РОБОЧИЙ ОРГАН, ЦИФРОВА МОДЕЛЬ, МІКРОРЕЛЬЄФ,
РАСТРОВА ЕЛЕКТРОННА МІКРОСКОПІЯ, ЗНОШУВАННЯ,
ЗЛАМ.**

Постановка проблеми. Сучасний та перспективний розвиток машинобудування, враховуючи і сільськогосподарського, як високотехнологічної галузі виробництва повинен спиратись на постійно зростаючий спектр передових досягнень з нанотехнологій [1, 2]. Це сповна стосується і сільськогосподарського виробництва. Зокрема, можливість появи небезпечних дефектів і руйнувань під час експлуатації конструкцій сільськогосподарської техніки необхідно розраховувати за розробки теоретичної основи створення нових матеріалів та виборі відповідного матеріалу ппід час конструювання техніки, а також – в процесі оцінки та прогнозування поведінки елемента конструкції у виробі на кожному етапі експлуатації.

Робочі органи сільськогосподарської техніки в результаті взаємодії з оброблюваним продуктом зношуються, а також руйнуються через злам. Інтенсифікація цих процесів взаємодії, особливо характерна для жорстких умов експлуатації збиральної техніки, суттєво зменшує довговічність робочих органів [3–5], що зумовлює

значні затрати через потребу заміни деталей чи їх зміни (шляхом регулювання, перестановки, ремонту).

У процесі зношування робочих органів суттєво змінюються їх геометричні параметри – форма та розміри. Такі зміни у спрацьованих робочих органах призводять не лише до поступового руйнування їх деталей, але й часто спричиняють поступове погіршення виконання ними технологічного процесу. Наприклад, у техніці для збирання бульбо- та коренеплодів внаслідок агресивного (передусім – абразивного) впливу на робочі органи складників вороху (грунтового та рослинного походження) змінюються технологічні зазори між робочими поверхнями, ступінь та рівномірність процесів сепарації та транспортування вороху.

Також, незважаючи на досягнення з матеріалознавства, кількість поломок деталей робочих органів через зломи, обумовлені процесом руйнування, зменшується досить повільно.

У сільськогосподарському машинобудуванні більшість деталей робочих органів та конструкцій машин і механізмів загалом виготовляється з металів. Це зумовлено рядом факторів, передусім – технологічністю матеріалу, відповідністю деталей експлуатаційним вимогам.

Зношування, тріщини, що спостерігаються експериментально на робочих поверхнях деталей, а також зломи, які формуються в процесі руйнування металевих матеріалів, характеризуються наявністю нерівностей різних розмірів. Оскільки процес руйнування має фрактальний характер, то дослідження електронних мікрофрактограм поверхонь руйнування дозволяє виявити ряд особливостей зв'язку параметрів руйнування з характеристиками структури матеріалів. Тому розробка адекватних математичних моделей процесів руйнування неможлива без урахування фрактальної особливості досліджуваної топографії поверхонь руйнування.

Одним із сучасних методів дослідження мікроповерхонь руйнування різноманітних дослідних об'єктів і матеріалів є отримання цифрових стереозображень мікроповерхонь твердих тіл на растрових електронних мікроскопах (РЕМ). Особливістю визначення кількісних параметрів цих поверхонь з високою точністю на мікронному і субмікронному рівнях є потреба врахування метричних характеристик цифрових РЕМ-зображень з кореляцією величин та характеру масштабних і геометричних спотворень, а також методів їх подальшого врахування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Явище зношування робочих органів сільськогосподарської техніки (враховуючи і

зношування робочих поверхонь коренебульбозбиральної техніки під час взаємодії із абразивним середовищем вороху, найперше – ґрунту, як найбільш агресивного за механічним впливом та значного за питомою часткою складника вороху) дуже важке, оскільки їх стійкість є багатофакторною функцією і досить складно теоретично обґрунтувати підбір матеріалу [3, 4 та ін.]. Незважаючи на велику кількість вітчизняних та закордонних досліджень, досі ще не знайдено однозначного зв'язку між опором стиранню та будь-якими властивостями матеріалу; між трібологічними властивостями та експлуатаційними чи іншими факторами [4]. Тому важливу роль відіграють експериментально-теоретичні методи досліджень робочих поверхонь тертя подібних за характером робочого процесу конструкцій сільськогосподарських машин, механізмів та пристроїв, які дозволяють обґрунтувати раціональне використання матеріалів у конструкціях. При цьому також враховуються механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів рослинного та тваринного походження [6 та ін.] у процесі їх взаємовпливу з робочими органами.

На сьогодні, спостерігається зацікавленість вчених-дослідників до тривимірного представлення мікротопографії поверхні як більш повному способу опису її мікрогеометрії.

Відомі спроби вітчизняних та закордонних дослідників [7–9] зі встановлення зв'язків мікротопографічних параметрів з експлуатаційними властивостями, однак найчастіше такі дослідження проводять за допомогою профілометричних пристроїв [10]. 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, до того ж без спостереження в мікроскоп [10]. У результаті, кількісна інформація про мікротопографічні властивості, що виявляють причини і наслідки, наприклад, зношування, є наближеною.

Труднощі в процесі збору вихідної інформації і визначення вихідних параметрів для тривимірного представлення поверхні певною мірою затримують подальший розвиток і впровадження мікротопографічних досліджень в інженерну практику.

Для розв'язку задачі коректної кількісної характеристики мікрогеометрії фрактографічних поверхонь або поверхонь твердих тіл у загальному випадку нами пропонується виконувати тривимірні (3-D) реконструкції цифрових моделей мікрорельєфу (ЦММР), що вивчаються з допомогою РЕМ в режимі мікрофотограмметричної зйомки [11]. На сьогодні, 3-D реконструкція є найменш реалізованою

серед найрізноманітніших застосувань ЕМ-досліджень. Водночас 3-D оцінка та відображення об'єктів на наномікрорівнях є надзвичайно важливою і потребує високої точності, достовірності і оперативності в режимі «on-line» [7, 9, 12, 13]. Для вирішення таких задач використовуються різні методи. 1. Метод 3-D реконструкції за різнофокусними зображеннями. Метод теоретично і програмно добре відпрацьований, але низької точності. 2. Просторове моделювання мікрорельєфних поверхонь за допомогою комп'ютерної мікроскопії. Цей метод має суттєві обмеження, а саме – діапазон малих збільшень світлової мікроскопії. 3. Достатньо повно вивченими є метод нано-мікрофотограмметрії із застосуванням РЕМ-фотограмметрії [11]. РЕМ-мікрофотограмметричний метод є порівняно універсальним, проте має ряд суттєвих особливостей. Головні з них – це значна невідповідність ЕМ-зображення до загальноприйнятої в фотограмметрії центральної проєкції; порівняно низька метрична якість РЕМ-зображення; висока зашумленість, некоректність за Адамаром 3-D реконструкції та інші. Ці питання потребують подальших ґрунтовних теоретичних і експериментальних досліджень, на актуальності яких неодноразово наголошувалось у ряді робіт вітчизняних і зарубіжних авторів.

У зв'язку з викладеним вище, особливо важливим є проведення РЕМ-стереофотограмметричних досліджень поверхонь зон руйнування деталей робочих органів, за результатами яких можна робити оцінку та аналіз просторових кількісних параметрів мікроповерхонь матеріалів деталей механізмів та машин. Невід'ємною частиною таких досліджень є моделювання ЦММР, як умова високоточного цифрового відтворення РЕМ-зображення. Отримані при цьому результати безпосередньо впливають на об'єктивність висновків про причини та механізми руйнування і, відповідно, є передумовою до розробки технологічних та інших заходів щодо підвищення надійності і ефективності робочих органів та виконуваних ними технологічних процесів.

Мета дослідження. Використання ортогональних поліномів Чебишева для моделювання ЦММР за РЕМ-зображеннями.

Результати дослідження. Виконаємо моделювання ЦММР апроксимуванням за ортогональними поліномами Чебишева [1, 11, 14], які широко застосовуються в різних галузях науки та техніки.

$$T_k(x) = \sum_{i=0}^k \epsilon_i T_i(x) \quad (1)$$

де $T_k(x) = \sum_{s=0}^k b_s x^s$ $T_l(y) = \sum_{i=0}^l b_i y^i$ – поліноми Чебишева, ортонормовані на

множині експериментальних \hat{z} даних.

У загальному вигляді поліноми Чебишева мають вигляд $T_n(x) = \cos(n \cdot \arccos(x))$. Цю формулу можна подати в рекурентному вигляді:

$$T_0(x) = 1, T_1(x) = x, T_2(x) = 2x^2 - 1, \dots \quad (2)$$

Тут

$$T_0 = 1, T_1 = x, T_2(x) = 2x^2 - 1;$$

$$T_3(x) = 4x^3 - 3x, T_4(x) = 8x^4 - 8x^2 + 1;$$

$$T_5(x) = 16x^5 - 20x^3 + 5x;$$

$$T_6(x) = 32x^6 - 48x^4 + 18x^2 - 1.$$

У нашому випадку задача вирішується у декілька етапів. На першому етапі визначається таблиця оцінок $\hat{z}(x, y)$ істинної функції $z(x, y)$ в N точках, розміщених у вузлах прямокутної сітки: N_x точок по координаті x з кроком $h(x_i)$ і N_y точок по координаті y з кроком $h(y_j)$. Експериментально отримані оцінки $z(x_i, y_j)$ спотворені похибками, тобто:

$$\hat{z}(x_i, y_j) = z(x_i, y_j) + \eta_{ij}, \quad (3)$$

де η_{ij} - незалежні випадкові похибки.

На другому етапі проводиться статистична обробка отриманих даних [15, 16]. Алгоритм апроксимації ЦММР заснований на мінімізації залишкової суми квадратів похибок.

$$S = \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} (\hat{z}(x_i, y_j) - T_k(x_i) - T_l(y_j))^2. \quad (4)$$

Після визначення коефіцієнтів b_{ks} та b_{lr} поліномів $T_k(x)$ та $T_l(y)$ і значення цих поліномів експериментальних точках $T_k(x_i)$ та $T_l(y_j)$, оцінки c_{kl} коефіцієнтів моделі (1) визначаються за формулою:

$$c_{kl} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} (\hat{z}(x_i, y_j) - T_k(x_i) - T_l(y_j)). \quad (5)$$

Вираз (5) для обчислення оцінок c_{kl} можна представити у вигляді:

$$c_{kl} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \hat{z}(x_i, y_j). \quad (6)$$

де $\hat{c}_k(y_j) = \frac{S_k(y_j)}{N - n + 1}$

З виразу (6) випливає, що оцінки c_{kl} можуть бути знайдені в результаті вирішення однотипних одномірних регресійних задач. Набір оцінок $c_k(y_j)$ можна розглядати як результат експериментальних вимірювань деякої функції координати y в фіксованих точках $y = y_j$ ($j = 1, 2, \dots, N_y$), якщо тепер вирішити одномірні регресійні задачі для кожного значення індексу $k \{k = 0, 1, \dots, m(y)\}$, то будуть знайдені всі оцінки коефіцієнтів ряду $c_{kl} \{k = 0, 1, \dots, m(x); l = 0, 1, \dots, m(y)\}$.

Під час вирішення кожної одномірної регресійної задачі визначається оптимальний степінь полінома виходячи із статистичної перевірки гіпотези про рівність нулю математичних очікувань оцінок $c_k(y_j)$ і $c_{kl}(x_i, y_i)$.

Якщо дисперсія первинних вимірювань апріорі не відома і може бути знайдена лише її оцінка:

$$\hat{\sigma}^2(y) = \frac{S_k(y)}{N - n + 1}, \quad (7)$$

де залишкова сума квадратів $S_k = (y_j)$ визначається за формулою

$$S_k = \sum_{j=1}^N (y_j - \hat{c}_k(y_j))^2, \quad (8)$$

то перевірку гіпотези про рівність нулю математичного очікування оцінки $c_k(y_j)$ можна виконувати за критерієм Фішера.

$$\left. \begin{aligned} T_k(x) &= \sum_{s=0}^k b_{ks} x^s \\ T_l(y) &= \sum_{r=0}^l b_{lr} y^r \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

- поліноми Чебишева ортонормовані на сукупності експериментальних даних.

Знаходження поліномів Чебишева і коефіцієнтів C_{kl} здійснюється в два етапи, як однотипові регресійні кореляційні задачі: спочатку знаходять поліноми Чебишева $T_k(x)$. Припустимо, що шукана функція висот ЦММР матиме вигляд:

$$z = \sum_{j=0}^r C_j T_j(\omega),$$

де r – степінь поліному.

Задача зводиться до знаходження коефіцієнтів C_j . Одержимо функцію F .

$$F = [C_0 T_0(x_1) + C_1 T_1(x_1) + \dots + C_r T_r(x_1) z_1]^2 + \dots + [C_0 T_0(x_n) + C_1 T_1(x_n) + \dots + C_r T_r(x_n) z_n]^2 = \min. \quad (10)$$

У розгорнутому вигляді запишемо систему рівнянь поправок.

$$\begin{cases} C_0 T_0(x_1) + C_1 T_1(x_1) + \dots + C_r T_r(x_1) z_1 = y_1 \\ C_0 T_0(x_2) + C_1 T_1(x_2) + \dots + C_r T_r(x_2) z_2 = y_2 \\ \vdots \\ C_0 T_0(x_n) + C_1 T_1(x_n) + \dots + C_r T_r(x_n) z_n = y_n \end{cases} \quad (11)$$

Або в матричному вигляді:

$$AX - L = V. \quad (12)$$

Тут

$$A = \begin{bmatrix} T_0(x_1) & T_1(x_1) & T_2(x_1) & \dots & T_r(x_1) \\ T_0(x_2) & T_1(x_2) & T_2(x_2) & \dots & T_r(x_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_0(x_n) & T_1(x_n) & T_2(x_n) & \dots & T_r(x_n) \end{bmatrix}; \quad (13)$$

$$A' = \begin{bmatrix} T_0(x_1) & T_0(x_2) & T_0(x_n) \\ T_1(x_1) & T_1(x_2) & T_1(x_n) \\ T_2(x_1) & T_2(x_2) & T_2(x_n) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ T_{10}(x_1) & T_{10}(x_2) & T_{10}(x_n) \end{bmatrix}; \quad (14)$$

$$A = \begin{bmatrix} T_0(x_1) & T_1(x_1) & T_2(x_1) \\ T_0(x_2) & T_1(x_2) & T_2(x_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ T_0(x_n) & T_1(x_n) & T_2(x_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_0(x_1) & T_1(x_1) & T_2(x_1) & \dots & T_r(x_1) \\ T_0(x_2) & T_1(x_2) & T_2(x_2) & \dots & T_r(x_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_0(x_n) & T_1(x_n) & T_2(x_n) & \dots & T_r(x_n) \end{bmatrix}; \quad (15)$$

$$X = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_n \end{bmatrix}; \quad (16)$$

$$L = (\hat{z}_1 \quad \hat{z}_2 \quad \hat{z}_3 \quad \dots \quad \hat{z}_n), \quad (17)$$

де \hat{z}_n – виміряні значення висот ЦММР.

$$V = \begin{bmatrix} v_1 & v_2 & v_3 & \dots & v_n \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Розв'язавши систему (12) за правилами матричної алгебри отримаємо вектор невідомих параметрів \bar{X} .

Після знаходження поліномів $T_k(x)$ відповідних коефіцієнтів C_j

аналогічним чином одержується поліноми $T_e(y)$. При цьому обчисленні значення поліномів $T_k(x)$ і коефіцієнт C_j приймаються за вихідні, тобто, задача інтерполяції поліномами Чебишева здійснюється спочатку в напрямку осі абсцис, а потім – осі ординат.

Точність апроксимування ЦММР поліномами Чебишева здійснюється за статистичним критерієм Фішера, тобто, співставленням дисперсій залишкових відхилень для двох рядів апроксимування з різними степенями r і $(r+1)$.

Висновки. Запропонований у статті математичний підхід до моделювання цифрової моделі мікрорельєфу шляхом апроксимування за ортогональними поліномами Чебишева дозволяє уточнити просторові кількісні параметри РЕМ-зображень мікроповерхонь твердих тіл, а тому буде корисний для аналізу процесів зношування та зламу металевих деталей робочих органів.

На сьогодні, у конструкціях сільськогосподарської техніки суттєво переважає застосування саме металевих деталей. Врахування уточнених даних РЕМ-зображень топографії поверхонь дає змогу підвищувати:

- надійність і ефективність металевих робочих органів та виконуваних ними технологічних процесів;

- ефективність прийняття широкого ряду технічних рішень з матеріалознавства, машинобудування, технології обробки сільськогосподарського продукту на етапах від проектування до експлуатації конструкції (стосовно складу та структури, трибологічних властивостей матеріалів; компоновальних схем робочих органів і конструкції машин загалом; конструктивних та кінематичних схем машин; ощадливого режиму поетапної обробки сільськогосподарського продукту тощо).

Література

1. Основи РЕМ-стереофрактографічних досліджень у матеріалознавстві та трибології: Монографія / А.В. Шостак, В.В. Широков, В.В. Божидарнік, С.В. Синій. – Луцьк: Ред.-вид. відд. Луцького НТУ, 2013. – 300 с.

2. Аналітичні та експериментальні методи стереофрактографічних досліджень у трибоматеріалознавстві: Звіт про НДР (заключний) / Луцький національний технічний університет; Керівник – В. В. Широков № 0112U000290. – Луцьк, 2013. – 330 с. Відповідальний виконавець: С. В. Синій.

3. Ткачёв В. Н. Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин [Текст] / В. Н. Ткачёв. – М.: Машиностроение, 1964. – 176 с.

4. Шостак А. В. Дослідження зношування та зламів чавунних деталей сільськогосподарської техніки / А. В. Шостак, В. В. Широков, С. В. Синій, М. Я. Варголяк // Сільськогосподарські машини: зб. наук. ст. — Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2013. — Вип. 25. — С. 181-189.

5. Напрямки вдосконалення бурякозбиральної техніки [Текст] / Р. Б. Гевко, І. Г. Ткаченко, С. В. Синій та ін. – Луцьк: ЛДТУ, 1999. – 168 с.

6. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів [Текст] / Г.А. Хайліс, А.Ю. Горбовий, З.О. Гошко та ін. – Луцьк, ЛДТУ, 1998. – 268 с.

7. Чмыхов Д.В. Виртуальная лаборатория микроскопии с использованием новых методов анализа изображений / Будущее высоких технологий и инноваций за молодой Россией. – Рыбинск, 2009. – С. 37–41.

8. Vishnyakov G.N. The IASTED International Conference on signal and image processing. / G.N. Vishnyakov, G.G. Levin, K.E. Loshchilov, K.A. Sukhrakov // Fouriersynthtsis profilometry – 2005. – с.103-105.

9. Соколов В.Н. Новый метод трехмерной реконструкции нано- и микрорельефа по сериям разнофокусных РЭМ-стереоизображений / В.Н. Соколов, О.В. Разгулина, Д.И. Юрковец, М.С. Чернов // Материалы XXIII рос. конф. по РЭМ. Тезисы докладов. – Черногловка, 2010. – С. 78.

10. Шероховатость поверхностей / Я.А. Рудзит, Ю.А. Кризберг // Микрогеометрия и эксплуатационные свойства машин. – Зинате, 1983. – С. 55.

11. Мельник В.М., Шостак А.В. Кількісна стереомікрофрактографія: Монографія. – Луцьк: Твердиня, 2010. – 457 с.

12. Иванчук О.М. Структура і функції програмного комплексу «Dimicros» для опрацювання РЕМ-зображень на цифровій фотограмметричній станції / О.М. Иванчук, І.В. Хрупін // Сучасні дос. геод. науки та виробництва. – Львів, 2012. – Вип. I (23). – С. 193–197.

13. Sokolov V.N. 3-D reconstruction of surface and Subsurface structures of Solids by SEM Stereo Images //Yurkovets D., Melnik V., Boude A., Howell P. /Inst.Phys. conf. Dundee, 2001. – P.168. – Section 4. – P. 109–122.

14. Preparata F., Shmos M. Вычислительная геометрия. – Springer-Verlag, 1985. – 322 p.



15. Гаврилова О.В. Определение геометрических характеристик конструкций по цифровым изображениям: автореф. дис. канд. техн. наук. – М., 1997. – 20 с.

16. Бендат Д., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. – М.: Мир, 1989. – 540 с.

Рецензент д.т.н., проф. В.Д. Рудь