

ДЕЯКІ ПИТАННЯ ФОТОГРАМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ФРАКТОГРАФІЧНИХ ПОВЕРХОНЬ

© Шостак А.В.*, Іванчук О.М.**, 1999

* Луцький Державний технічний університет

** ДУ “Львівська політехніка”

Приведены теоретические и экспериментальные исследования, подтверждающие целесообразность применения фотограмметрических методов для изучения поверхностей, деформированных в результате трения, износа, излома и пр., в частности для определения количественных параметров шероховатости поверхности, углов наклона граней фасеток излома, площади поверхности излома и др.

The theoretical and experimental studies confirm the application of photogrammetric methods for studing of surfaces which is deformed by friction, tear, spoilt etc. In particular the definition of quantitative parameters of roughness surface, slope facet of broken surface, area of broken surface and etc. are given.

У механіці руйнування найважливішими є питання вивчення поверхонь зламу (зносу), або фрактографічних поверхонь, шорсткості тощо. Для їх розв'язку пропонується застосовувати фотограметричні методи (1,5).

Традиційно фрактографічне вивчення поверхонь руйнування зводиться до порівняння профілеметричних показників геометрично правильних поверхонь (кубічних, конічних або сферичних). Проте для подібного підходу характерна через велику розбіжність даних невисока точність, а тому застосовується він лише для наближених оцінок. З цих міркувань важливою є задача узагальнення.

1. Нехай $h = Q(x)$ – апріорі невідома функція, яка відображає залежність відносної висоти досліджуваної поверхні від елемента x лівого зображення РЕМ-стереопари. Після визначення висот h_s у точках x_s виникає задача оцінки функції Q за відомою множиною пар $\{(x_s, h_s) : 0 \leq s \leq S-1\}$. Ця задача за своєю постановкою є задачею екстраполяції функції двох змінних, відомих для скінченної множини точок. Для її розв'язку скористаємося відображенням мікрорельєфу як випадкового поля сумою циліндричних складових.

Нехай

$$Q(x) = \sum_{j=0}^{t-1} Q_j(x), \quad (1)$$

де $Q_j(x)$ – циліндрична функція виду: $Q_j(x) = C_j(x_1 \cos \alpha_j + x_2 \sin \alpha_j)$,

де x_1, x_2 – координати x ; $C_j(t)$ – апріорі невідомі функції однієї змінної

$$\alpha_j = \pi \cdot j \cdot \tau^{-1} \quad (0 \leq j \leq t-1) \quad (3)$$

Нехай

$$t_s = \left(x_1^{(s)} \cos \alpha_s + x_2^{(s)} \sin \alpha_s \right), \quad (4)$$

де $x_1^{(s)}, x_2^{(s)}$ – координати x_s ($0 \leq s \leq s-1$).

Тепер розглянемо загальну модель для функцій $C_j(t)$ і будемо вважати їх кусочно-лінійними на ділянках від $T(j, k)$ до $T(j, k+1)$, ($0 \leq k \leq s-2$). Кути нахилу на цих відрізках позначимо через $u_{j,k+1}$. Тоді:

$$C_j(T(j, k)) = u_{j,0} + \sum_{m=0}^{k-1} [T(j, m+1) - T(j, m)] u_{j,m+1}, \quad (5)$$

де $u_{j,0}$ – початкове значення $C_j(t)$,

$$a q_s = h_s \quad (0 \leq s \leq s-1), \quad (6)$$

де за визначенням

$$q_s = \sum_{j=0}^{\Delta\tau-1} \left\{ u_{j,0} + \sum_{m=0}^{\text{ord}(s)-1} [T(j, m+1) - T(j, m)] u_{j,m+1} \right\}, \quad (7)$$

($0 \leq s \leq s-1$). У такій постановці задача екстраполяції зводиться до вибору змінних $u_{j,k}$ ($0 \leq j \leq \tau-1, 0 \leq k \leq s-1$), що задовільняють лінійні рівняння (6). Оскільки такий вибір здійснюється неоднозначно, і ми прагнемо до найбільшої гладкості апроксимуючої поверхні, то для однозначного вибору змінних $u_{j,k}$ доцільно скористатися МНК, мінімізуючи квадратичний функціонал “дії”

$$W = \sum_{j=0}^{\tau-1} \sum_{k=0}^{s-2} u_{j,k+1} [T(j, k+1) - T(j, k)], \quad (8)$$

при лінійних обмеженнях (6).

Окрім того, для врахування помилок вимірювання h_s доцільно мінімізувати квадратичний функціонал

$$\tilde{W} = W + \gamma \sum_{k=0}^{s-2} u_{j,k+1}^2, \quad (9)$$

При лінійних обмеженнях

$$\begin{cases} q_s = h_s + u_{j,s} & (1 \leq s \leq s-1), \\ q_0 = 0 \end{cases} \quad (10)$$

де q_s, W – визначаються за формулами (7,8); $\gamma > 0$ – параметр, який враховує “рівень” точності вимірювання h_s ($1 \leq s \leq s-1$); $u_{j,k}$ – помилки вимірювання h_s .

При цьому вважається, що нульова точка у списку $\{x_s : 0 \leq s \leq s-1\}$ є початком координат, в якій відносна висота відома і дорівнює нулю.

Як приклад на рис.1 дається аксонометрична проекція поверхні, одержаної в результаті виконаного моделювання. Моделювання виконувалося на EOM IBC PC/AT 486 за даними PEM-стереовимірювань. “Ідеальну” поверхню крихкого руйнування показано на рис.2.

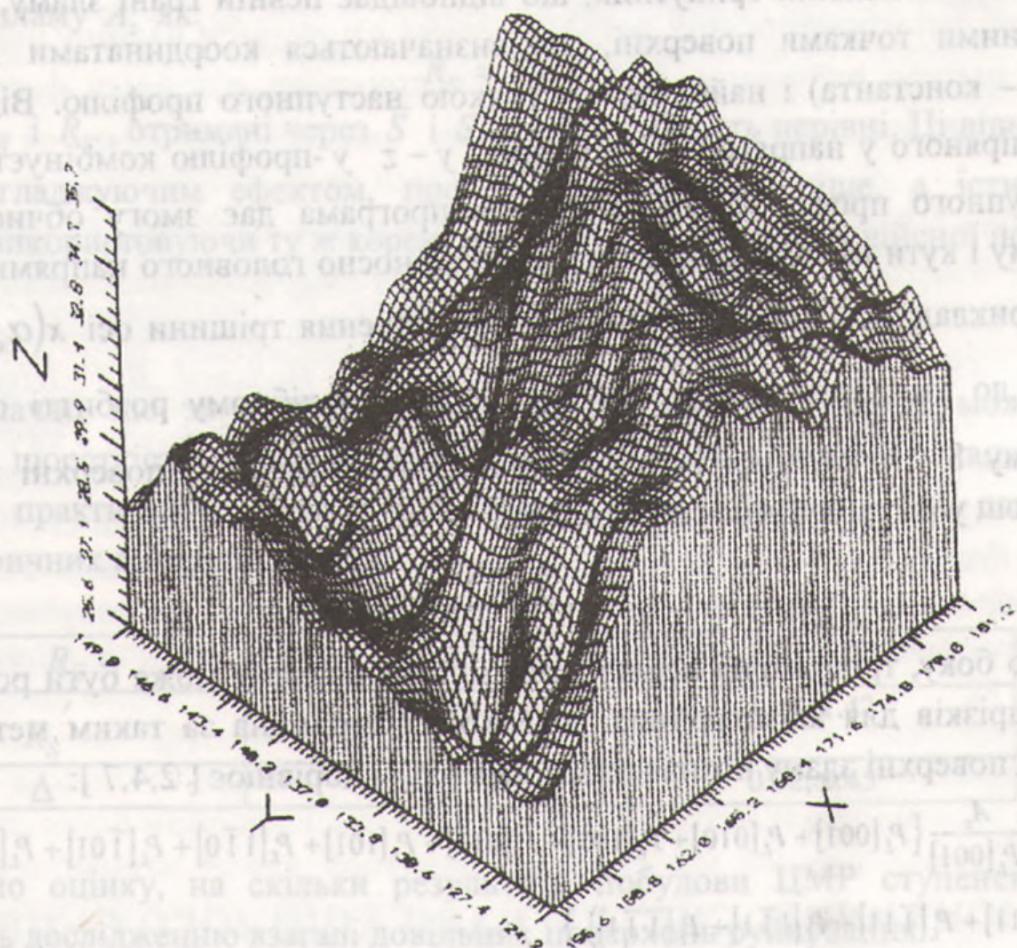


Рис.1. Цифрова модель мікрорельєфу поверхні руйнування, побудована за методом екстраполяції РЕМ-стереовимірювань

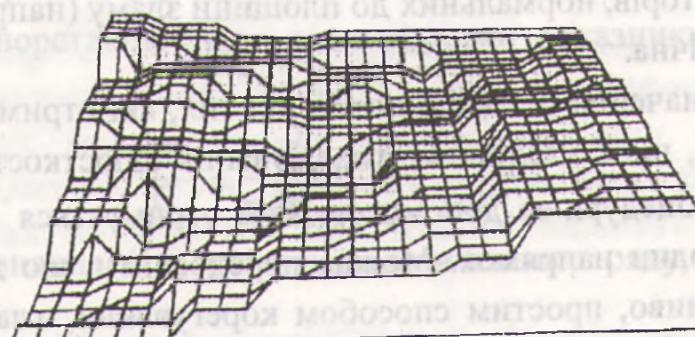


Рис.2. Перспективна проекція ступінчастої поверхні крихкого руйнування

2. Важливою особливістю фотограметричного методу моделювання є можливість його використання для кількісної оцінки тривимірної шорсткості і кутового розподілу граней зламу. Якщо просторові координати точок поверхні отримані в результаті екстраполяції або побудови ЦМР з достатньою щільністю, то можна будувати сітку трикутників, в якій кожний трикутник, що відповідає певній грани зламу, утворюється двома суміжними точками поверхні, які визначаються координатами $x - z$ одного профілю (y – константа) і найближчою точкою наступного профілю. Відповідно для профілю, виміряного у напрямку y дві пари $y - z$ профілю комбінуються з однією точкою наступного профілю. Тоді машинна програма дає змогу обчислити площину поверхні зламу і кути нахилу фасеток (граней) відносно головного напрямку механічної напруги, наприклад, осі $z(\alpha_z)$ або напрямку поширення тріщини осі $x(\alpha_x)$ і напрямку, нормального до цих двох осей – осі $y(\alpha_y)$. При подібному розбитті оцінка площини поверхні зламу S отримується із трикутників граней (фасеток) поверхні через просте додавання площ усіх трикутників $\alpha_{i,j}$, тобто

$$\bar{S} = \sum_{i,j} \alpha_{i,j}. \quad (11)$$

З іншого боку, тривимірна нерегулярна поверхня зламу може бути розрахована за щільністю відрізків для анізотропних поверхонь. Отримана за таким методом оцінка дійсної площини поверхні зламу позначається через S' і дорівнює [2,4,7]:

$$S' = \frac{2}{10 \cdot 73} \frac{A_z}{P_L[001]} \left\{ P_L[001] + P_L[010] + P_L[100] + P_L[011] + P_L[101] + P_L[1\bar{1}0] + P_L[\bar{1}01] + P_L[0\bar{1}1] + \sqrt{\frac{3}{4}} (P_L[111] + P_L[\bar{1}\bar{1}1] + P_L[1\bar{1}1] + P_L[\bar{1}\bar{1}1]) \right\} \quad (12)$$

де A_z – площа поверхні, спроектованої в напрямку z на площину, яка відповідає дійсному розміру площини, покритої точками даних $x - y$ на ненахилений РЕМ-знімок; $P_L[001]$ – щільність векторів, нормальні до площини зламу (напрямок z), для інших P_L – інтерпретація аналогічна.

Отримані так значення S' дещо нижчі від тих, які отримані шляхом обчислень за трикутними гранями, що є наслідком згладжування шорсткості поверхні зламу вздовж обох напрямків в процедурі, за допомогою якої отримується \bar{S} , тоді як у випадку \bar{S} згладжується лише один напрямок. Можна передбачити, що дійсна площа поверхні S буде більша, і, можливо, простим способом корегування згладжування оцінювати за відхиленнями між \bar{S} (одне згладжування) і S' (немає згладжування), тобто за різницю між S' і \bar{S} , внаслідок рівновіддаленого положення точок вихідних даних. Отже, ми отримуємо скореговану експериментальну оцінку S^C для дійсної площини S :

$$S^C = \bar{S} \cdot \frac{\bar{S}}{S'} = S' \left[\frac{\bar{S}}{S'} \right]^2. \quad (13)$$

Згладжуючих ефектів через рівновіддаленість профілів і відповідний набір точок можна уникнути, якщо вимірювати координати кутів фактичних граней зламу або

використовувати досить тісне розміщення профілів. Отже, цим методом можна отримати достовірну оцінку дійсної площині поверхні S .

3. Більшість авторів [3,6] погоджуються з твердженням, що шорсткість поверхні R , можна виразити відношенням між дійсною площею поверхні зламу S та її проекцією на площину зламу A' , як:

$$R_S = S / A' \quad (14)$$

Тоді $R_{\bar{S}}$ і $R_{S'}$, отримані через \bar{S} і S' , мабуть, будуть нерівні. Ці відмінності також зумовлені згладжуючим ефектом, про що згадувалося вище, а істинне значення визначимо, використовуючи ту ж корекцію, що і для визначення дійсної поверхні, тобто

$$R_S^C = \frac{S^C}{A'} = R_{\bar{S}} \cdot \frac{R_{\bar{S}}}{R_{S'}}. \quad (15)$$

Це означає, що за даними оцінок дійсної площині поверхні можна визначити скореговану шорсткість поверхні, вільної від помилок вимірювань і згладжування. Деякі результати практичного визначення шорсткості поверхні за даними стереофотограметричних вимірювань такі:

$R_{\bar{S}}$	1.50; 1.45	1.90; 1.87
$R_{S'}$	1.20; 1.18	1.48; 1.42
Δ	0.30; 0.27	0.32; 0.45

4. Дамо оцінку, на скільки результати побудови ЦМР ступеневих поверхонь відповідають дослідженню взагалі довільних поверхонь руйнування.

З цією метою скористаємося відомою в профілеметрії поверхні руйнування теоремою, що "поверхні руйнування з однаковими показниками шорсткості мають приблизно однакові профільні показники шорсткості" [1,3,6]. Для ідеальної ступеневої поверхні руйнування в роботі [6] одержано загальне співвідношення між середніми показниками профілю шорсткості \bar{K}_p і відповідними показниками шорсткості окремої ділянки:

$$\frac{1}{\bar{K}_p} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n (2 - K_A)^n}{(2n + 1) K_A^{n+1}}. \quad (16)$$

Якщо записати рівняння (16) у вигляді скінченного ряду, то після нескладних перетворень отримаємо:

$$\frac{1}{\bar{K}_p} = \frac{4}{\pi} \left[\frac{1}{K_A} - \frac{(2 - K_A)}{3K_A^2} + \frac{(2 - K_A)^2}{5K_A^3} - \frac{(2 - K_A)^3}{7K_A^4} \right]. \quad (17)$$

Аналізуючи одержаний вираз, можна встановити, що коли $K_A = 2$, що відповідає поверхні з довільною кривиною, розподіл орієнтації елементів поверхні і локальна кривина окремих ділянок поверхні руйнування не впливає на однозначність кореляції між \bar{K}_A і \bar{K}_p . Цей результат може тлумачитися так: якщо вважати перший член у рівнянні (17) як такий, що враховує невпорядкованість кривини поверхні, то члени вищого порядку можна розглядати як поправки на відхилення аналізованої поверхні від

повністю довільної поверхні руйнування. Зауважимо, коли $K_A = 1$, що відповідає випадку “ідеально плоскої поверхні руйнування”, то і $\bar{K}_p = 1$. Численні розрахунки підтвердили, що для значень K_A , важливих для фрактографії, відмінності становлять приблизно 2–3 %, що практично не суттєво.

Висновок: фотограметричний метод дає змогу отримувати надійну інформацію про особливості поверхні руйнування, характер просторового розподілу фасеток (граней) механічних зламів; корегуючу оцінку шорсткості.

1. Мельник В.М., Соколов В.Н. и др. *Метод трехмерной реконструкции микрорельефа поверхности твердых тел по их РЕМ-стереоизображениям* // Изв. РАН. Сер. физич. 1995. Е.59. №2. С.28–34.
2. Салтыков С.А. *Стереометрическая металлография*. М., 1970.
3. Хусу Н.П., Витенбург Ю.Р., Пальмов В.А. *Шероховатость поверхностей. Теоретико-вероятностный подход*. М., 1975.
4. Чернявский К.С. *Стереология в металловедении*. М., 1977.
5. Boyde A., Ross H.F. *Photogrammetry and the Scanning Electron Microscope* // Photogrammetrie Record. 1975. V.8, №46. P.408–457.
6. El-Soudani S.M. *Profilometrie analysis of fractures* // Metallography. 1978. 11. P.247–336.
7. Exner H., Fripan M. // *Quantitative assessment of three-dimensional roughness, anisotropy and angular distribution of fracture surfaces by stereometry* // Jurnal of Microscopy. 1985. V.138. P.161–178.