

МЕТОД КІЛЬКІСНОГО ЕКСПРЕС-АНАЛІЗУ ПОВЕРХНІ МЕТАЛІВ

ВАРЕЦЬКИЙ Я.Ю.

Пропонується новий експрес-метод кількісного аналізу рельєфу поверхні металу, поданого у вигляді нерегулярної хмари точок. Кількісний аналіз поверхні взірця пропонується проводити у двох напрямках: двовимірний та тривимірний аналіз. Пропонується підхід до розрахунку стандартизованих параметрів поверхні, який враховує нерегулярність вхідних даних.

1. Вступ

Корозія нафтопроводів через високу агресивність робочого середовища, вплив підвищених температур, тисків, гідродинамічних факторів є причиною великої кількості аварій, що наносять величезний екологічний і економічний збиток. За літературними даними, сталі трубопроводів схильні до локальної корозії. На сьогодні відомі такі методи корозійного моніторингу встаткування на стадії експлуатації:

1. Візуальний огляд.
2. Гравіметричний метод.
3. Метод електричного опору.
4. Ультразвукова, магнітометрична й акустична дефектоскопія.

Для кожного з методів характерні різні значення точності та вартість обладнання для вимірювання. Більшість відомих методів проводять оцінку лише інтегральних показників корозії (наприклад, середню швидкість суцільної корозії), але жоден з них не дозволяє оцінити глибину та форму дефекту.

Основні результати металографічних і фрактографічних досліджень показують, що виникнення виразкової й пітингової корозії в процесі експлуатації технологічного встаткування становить серйозну небезпеку, адже ініціює інші види корозії, наприклад, корозійне розтріскування та міжкристалічну корозію, саме тому при проведенні періодичного моніторингу та прогнозуванні зміни корозійного стану конструкцій часто необхідною є інформація про глибину та форму локального руйнування.

У випадку необхідності моніторингу нерівномірної або місцевої корозії обладнання на стадії експлуатації глибину корозійних уражень вимірюють за допомогою індикатора годинникового типу.

Проаналізувавши відомі підходи та технології корозійного моніторингу встаткування на стадії експлуатації, приходимо до висновку про необхідність створення експрес-методу неруйнівного контролю поверхні об'єктів, який дозволив би оцінити глибину та форму локальних пошкоджень.

На даний час відновлення форми локального пошкодження можливе за допомогою такого обладнання:

- голковий профілометр;
- оптичний 3D профілометр;
- скануючий зондовий мікроскоп;
- растровий електронний мікроскоп.

Перелічені методи є точними, отриманий аналіз інформативний, але підходить до аналізу суто лабораторні. Саме тому надзвичайно актуальною задачею є створення нових методів моніторингу на стадії експлуатації поверхонь металевих конструкцій нафтогазової промисловості.

2. Опис методу

У даній роботі пропонується новий підхід до аналізу поверхні, основою якого є тривимірна реконструкція – метод створення тривимірної моделі поверхні об'єкта у числовій формі за допомогою сучасних обчислювальних засобів.

Відомо декілька варіантів вирішення задачі тривимірної реконструкції: реконструкція за напівтонами, реконструкція за наявністю розфокусованих елементів зображення, пряме оцінювання глибини. У наших дослідженнях було використано метод тривимірної реконструкції поверхні за декількома проєкціями, який полягає у відновленні тривимірної форми об'єкта по декількох його двовимірних відображеннях. Загальна послідовність етапів така:

1. Калібрація камери.
2. Реєстрація двовимірних зображень об'єкта.
3. Встановлення епіпольярної геометрії.
4. Погодження зображень.
5. Перерахунок двовимірних точок зображення у тривимірні точки поверхні.

Кожен з етапів – це складна задача, яка вимагає окремого дослідження. Для вирішення задачі створення методів експрес-аналізу необхідно було провести оптимізацію кожного з етапів, адже ефективність окремого етапу впливатиме на кінцевий результат – проведення кількісного аналізу. Для кожного з етапів запропоновано нові підходи. Особливості реалізації деяких етапів висвітлено у роботах [1,2].

У даній роботі основну увагу присвячено створенню швидких методів апроксимації поверхні та розгляді підходів до її аналізу.

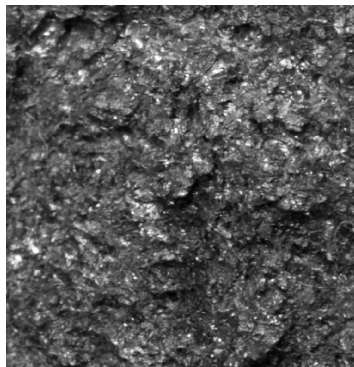
Результатом тривимірної реконструкції є набори з n нерегулярних точок, так звані хмари точок (рис.1).

Оскільки отримані точки є нерегулярними, для них неможливо застосувати відомі методи фільтрації та провести оцінку геометричних параметрів поверхні. Для здійснення «упорядкування даних» було вирішено задачу створення цифрової моделі рельєфу поверхні досліджуваного взірця у формі тривимірної

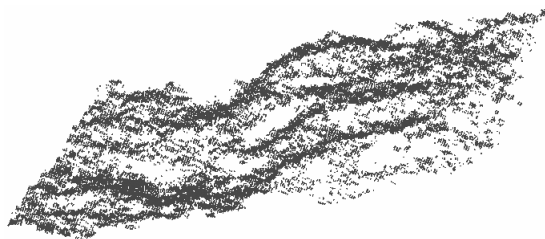
поверхні, яка інтерполуює скінченну множину нерегулярних точок:

$$(x_1, y_1, z_1), \dots, (x_n, y_n, z_n) \in \mathbf{R}^3.$$

Оскільки отримані алгоритми повинні бути застосовані в системі мобільного експрес-аналізу, основною вимогою є необхідність аналізу зображень в режимі реального часу на обчислювальній системі невеликої потужності (ноутбук).



а



б

Рис. 1. Вхідні дані: а – аналізована поверхня; б – хмара точок

Було проаналізовано різноманітні алгоритми побудови цифрової моделі поверхні із наборів нерегулярних точок (таблиця).

Оцінка обчислювальної складності

Метод	Складність
Зворотні зважені відстані	$O(n^2)$
Крігінг	$O(n^3)$
Радіальні базисні функції	$O(n^3)$
Натуральні сусіди	$O(n \log n) - O(n^2)$
Двовимірна лінійна інтерполяція на основі триангуляції Делоне	$O(n) - O(n \log n)$

Жоден із відомих методів не забезпечував необхідної швидкодії, адже обчислювальна складність більшості алгоритмів є квадратичною. Для досягнення необхідної швидкодії було створено алгоритм двовимірної лінійної інтерполяції на основі триангуляції Делоне нерегулярного набору точок, який забезпечив лінійну складність алгоритму. Швидкодія отриманого алгоритму знаходиться в межах $2s$, що дозволяє реалізувати систему для кількісного аналізу поверхні в режимі реального часу.

Результати оцінки глибини та форми локального ушкодження за допомогою розробленого методу наведені у роботі [3]. Окрім проведення кількісного аналізу локальних пошкоджень, на основі методу вирішено задачі оцінки інтегральних статичних та динамічних параметрів поверхні.

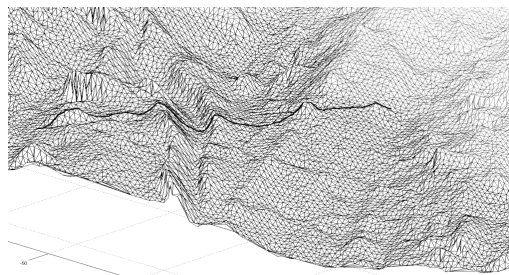
Кількісний аналіз поверхні взірця проводився у двох напрямках: двовимірний аналіз та тримірний аналіз.

3. Двовимірний аналіз поверхні

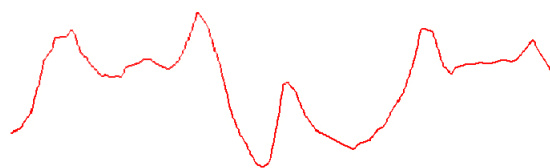
Проведення двовимірного аналізу поверхні передбачає отримання профілю поверхні в довільному напрямку в межах заданої базової лінії відповідно до обраного класу точності (рис.2).

Профіль – це частина нормального січення $y = Y(t)$ аналізованої поверхні деякою площиною. У цій площині здійснюється двовимірний аналіз отриманого профілю.

Після одержання первинних даних профілю у вигляді наборів $\{t_i, y_i\}$ проводилися такі етапи: нівелювання, пошук середньої лінії, оцінка параметрів профілю згідно зі стандартами ГОСТ 2789 та EN ISO 13565-2:1996.



а



б

Рис. 2. Побудова профілю поверхні матеріалу: а – нормальне січення поверхні; б – неопрацьована крива профілю

На першому етапі побудови профілю здійснювалося нівелювання нахилу отриманої кривої профілю з використанням методу найменших квадратів [4]. Для цього необхідно здійснити оцінку параметрів a і b лінійної регресійної моделі $y = at + b$, де

$$a = \frac{\overline{ty} - \overline{t}\overline{y}}{\overline{t^2} - \overline{t}^2}, \quad b = \overline{y} - a\overline{t}.$$

Використовуючи інформацію з n точок профілю, оцінюємо параметри

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad \bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i, \quad \overline{ty} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i y_i, \quad \overline{t^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i^2.$$

Отриману площину необхідно відняти з первинної поверхні. Операція здійснюється по нормалі до лінії найменших квадратів за формулою:

$$\tilde{y}_i = (y_i - (at_i + b)) * \cos(\arctg(a)),$$

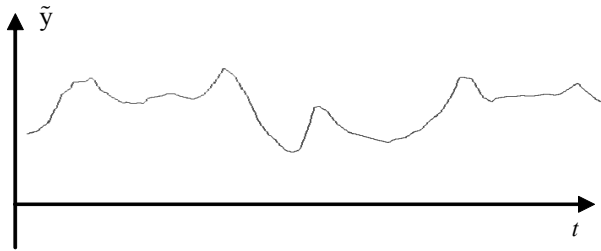
де $\tilde{y}_i = \tilde{Y}(t_i)$ – профіль після нівелювання.

Приклад нівелювання даних профілю за методом найменших квадратів представлений на рис. 3.

Усі параметри шорсткості розраховуються в межах базової довжини l , яка вибирається залежно від максимальної висоти шорсткості відповідно до класу точності. Як базову береться середня лінія профілю.



а



б

Рис. 3. Нівелювання даних профілю: а – вихідні дані; б – після нівелювання

Середня лінія профілю h_{mid} – це лінія, розташована паралельно напрямку профілю на такій висоті, що сумарна площа матеріалу над нею дорівнює сумарній площі пустот під нею:

$$\int_{\tilde{Y}(t) > h_{mid}} (\tilde{Y}(t) - h_{mid}) dt = \int_{\tilde{Y}(t) < h_{mid}} (h_{mid} - \tilde{Y}(t)) dt.$$

У дискретній формі

$$\sum_{\tilde{y}_i > h_{mid}} (\tilde{y}_i - h_{mid}) = \sum_{\tilde{y}_i < h_{mid}} (h_{mid} - \tilde{y}_i).$$

Пошук середньої лінії проводиться ітераційними методами. Для цього вводиться пробна лінія, положення якої послідовно змінюється доти, поки умова не виконана з достатньою точністю.

Оскільки різниця площ матеріалу над і порожнеч під пробною лінією рівномірно зменшується зі збільшенням її висоти, доцільно застосовувати пошук методом

бісекції. Перед першою ітерацією інтервал пошуку такий:

$$[a_0, b_0] = \left[\max_{i=1 \dots n} \tilde{y}_i, \min_{i=1 \dots n} \tilde{y}_i \right], \quad (1)$$

а початкова висота розташування середньої лінії – це середина даного інтервалу:

$$h_{mid} = \frac{a_0 + b_0}{2}. \quad (2)$$

Обчислюємо такі суми:

$$S_{mat} = \sum_{Y(t_i) > h_{mid}} (\tilde{y}_i - h_{mid}),$$

$$S_{cav} = \sum_{Y(t_i) < h_{mid}} (h_{mid} - \tilde{y}_i).$$

Якщо площа порожнеч S_{cav} перевищує площу матеріалу S_{mat} , то новий інтервал – це

$$[a_1, b_1] = [a_0, h_{mid}],$$

а в протилежному випадку

$$[a_1, b_1] = [h_{mid}, b_0].$$

Дії (1) та (2) повторюються для нової ітерації. Ітерації тривають доти, поки інтервал пошуку не стане досить малим, або не буде знайдене точне значення h_{mid} .

Відповідно до отриманої середньої лінії перелічуємо дані профілю

$$\tilde{\tilde{y}}_i = \tilde{y}_i - h_{mid}, \quad i = 1 \dots n.$$

Для профілю у вигляді

$$\tilde{\tilde{y}}_i = \tilde{\tilde{Y}}(t_i), \quad i = 1 \dots n$$

проводимо кількісний аналіз поверхні матеріалу, оцінюючи необхідні параметри шорсткості (рис.4).

Це, насамперед, найбільш використовувані висотні параметри R_a , R_z , R_q , а також крокові параметри S та S_m .

Так, для середньоарифметичного відхилення профілю:

$$R_a = \frac{1}{l} \int \left| \tilde{\tilde{Y}}(t) \right| dt \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{\tilde{y}}_i.$$

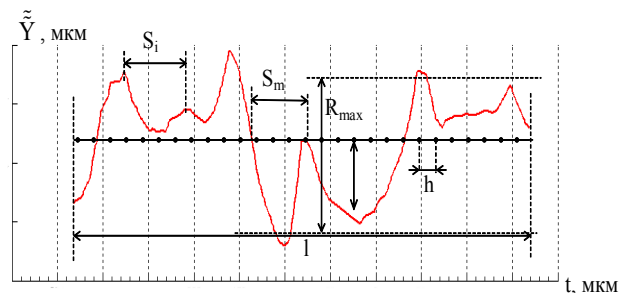


Рис.4. Кількісний аналіз профілю поверхні матеріалу

Також вирішено задачу побудови кривої Аббота для заданого профілю, що дозволило оцінювати параметри шорсткості відповідно до міжнародних стандартів, а саме R_{pk} , R_k , R_{vk} .

Роздільна здатність запропонованого методу знаходиться на рівні 10 мкм, що дозволяє аналізувати поверхні до 3-го класу шорсткості включно. Точність методу на рівні $\pm 10\%$. Очевидно, що отримання цих характеристик при використанні лише голкового профілометра є нетривіальною задачею.

4. Тривимірний аналіз поверхні

Аналіз поверхні складається з таких етапів: нівелювання поверхні, побудова середньої поверхні, оцінка параметрів відповідно до стандарту ISO 25178.

При профільному аналізі основним засобом виділення шорсткості із первинних даних профілю є нівелювання нахилу методом найменших квадратів. За аналогією із двовимірним випадком, операція нівелювання виділяє з поверхні, а потім відфільтровує площину найменших квадратів. Рівняння площини найменших квадратів шукається у явному вигляді $z = ax + by + c$, критерієм відбору є мінімум функціоналу:

$$\min \left[\iint_S (ax + by + c - F(x, y))^2 dS \right],$$

де S – площа нівельованої ділянки поверхні. Для знаходження екстремального значення функціоналу необхідно прирівняти нулю його часткові похідні по шуканих параметрах площини a , b , c :

$$a = \frac{\overline{xz} - \overline{x}\overline{z}}{\overline{x^2} - \overline{x}\overline{x}}, \quad b = \frac{\overline{yz} - \overline{y}\overline{z}}{\overline{y^2} - \overline{y}\overline{y}}, \quad c = \overline{z} - a\overline{x} - b\overline{y}.$$

При обробці ділянки, заданої в цифровій формі, інтегрування по його поверхні замінюється сумою по всіх відліках (точках хмари):

$$\sum_{i=1}^N (ax_i + by_i + c - F_i)^2,$$

$$\overline{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad \overline{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i, \quad \overline{z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i,$$

$$\overline{x^2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2, \quad \overline{y^2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2,$$

$$\overline{xz} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i F_i, \quad \overline{yz} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i F_i.$$

Отриману площину необхідно відняти з первинної поверхні. Операцію здійснюємо по нормалі до площини найменших квадратів за формулою:

$$\tilde{F}_i = (F_i - (ax_i + by_i + c)) \times \cos(\arctg(a)) \times \cos(\arctg(b)).$$

де $\tilde{F}(x, y)$ – хмара точок поверхні взірця після нівелювання.

Результат нівелювання похилої ділянки поверхні за методом найменших квадратів представлено на рис.5.

Базою відліку при обчисленні параметрів топографії поверхні є середня площина [5-7]. Середня площина

– це горизонтальна площина, розташована на такій висоті F_{mid} , що об'єм матеріалу над нею дорівнює об'єму порожнечі під нею:

$$\iint_{\tilde{F}(x,y) > F_{mid}} (\tilde{F}(x, y) - F_{mid}) dx dy = \iint_{\tilde{F}(x,y) < F_{mid}} (F_{mid} - \tilde{F}(x, y)) dx dy. \quad (3)$$

Пошук середньої площини проводиться ітераційними методами. Для цього вводиться пробна площина, положення якої послідовно змінюється доти, поки умова (3) не виконана з достатньою точністю.

Оскільки різниця об'ємів матеріалу над і порожнечі під пробною площиною рівномірно зменшується зі збільшенням її висоти, доцільно застосовувати пошук методом бісекції. Початковим інтервалом пошуку середньої площини береться

$$[a_0, b_0] = \left[\max_{i=1 \dots N} \tilde{F}_i, \min_{i=1 \dots N} \tilde{F}_i \right]. \quad (4)$$

Приймаємо, що початкова висота розташування середньої площини така:

$$F_{mid} = \frac{a_0 + b_0}{2}. \quad (5)$$

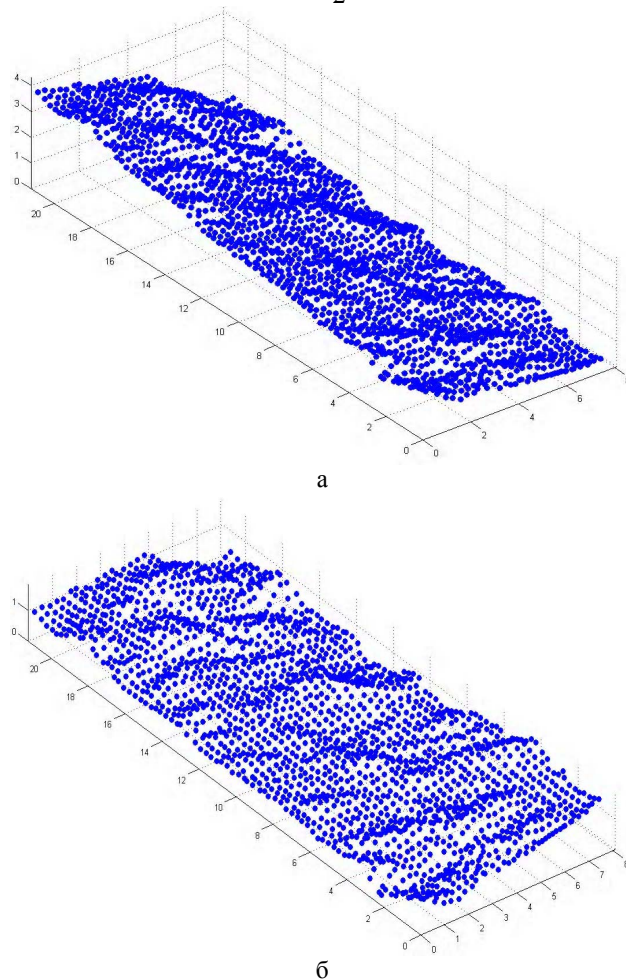


Рис. 5. Нівелювання поверхні взірця: а – аналізована поверхня; б – після нівелювання

Об'єми матеріалу над і пустот під передбачуваною середньою площиною обчислюються так:

$$V_{\text{mat}} = \iint_{\tilde{F}(x,y) > F_{\text{mid}}} (\tilde{F}(x,y) - F_{\text{mid}}) dS, \quad (6)$$

$$V_{\text{void}} = \iint_{\tilde{F}(x,y) < F_{\text{mid}}} (F_{\text{mid}} - \tilde{F}(x,y)) dS, \quad (7)$$

де S – площа, по якій здійснюється аналіз поверхні взірця в межах базової площини.

Оскільки вхідні дані представляють собою нерегулярні відліки в межах базової площини, для обчислення об'ємів (6) та (7) застосовуємо модель поверхні у вигляді нерегулярної сітки трикутників, отриману на першому етапі дослідження.

Інтеграли (6) та (7) записуються в дискретному вигляді так:

$$V_{\text{mat}} = \sum_{\tilde{F}(x_i, y_i) > F_{\text{mid}}} \sum_{i=1}^N (\tilde{F}(x_i, y_i) - F_{\text{mid}}),$$

$$V_{\text{void}} = \sum_{\tilde{F}(x_i, y_i) < F_{\text{mid}}} \sum_{i=1}^N (F_{\text{mid}} - \tilde{F}(x_i, y_i)),$$

де $\tilde{F}(x_i, y_j)$ – дискретні регулярні відліки, отримані на основі моделі поверхні аналізованого взірця. Крок дискретизації по осі X та осі Y дорівнює мінімальній віддалі між парами точок по всій множині точок хмари.

Якщо об'єм пустот V_{cav} перевищує об'єм матеріалу V_{void} , то новий інтервал – це $[a_1, b_1] = [a_0, F_{\text{mid}}]$, а в протилежному випадку $[a_1, b_1] = [F_{\text{mid}}, b_0]$.

Дії (4) та (5) повторюються для нової ітерації. Ітерації тривають доти, поки інтервал пошуку не стане досить малим, або не буде знайдено точне значення F_{mid} .

Відповідно до отриманої середньої площини перераховуємо дані поверхні: $\tilde{\tilde{F}}_i = \tilde{F}_i - F_{\text{mid}}$, $i = 1 \dots N$. Далі під $\tilde{\tilde{F}}(x_i, y_i)$ розуміємо набір дискретних відліків функції відхилення нерівностей аналізованої поверхні від середньої площини та для нової хмари точок у вигляді:

$$\tilde{\tilde{F}}_i = \tilde{\tilde{F}}(x_i, y_i), \quad i = 1 \dots N$$

проводитися кількісний тривимірний аналіз поверхні матеріалу.

Поаналогії до профільної оцінки, параметричний аналіз топографії поверхні передбачає аналіз по деякій прямокутній базовій ділянці поверхні. Усереднення значення параметрів по кількох вимірюваннях не проводиться, оскільки кожна двовимірна ділянка вже містить у собі достатню кількість статистичної інформації.

Відповідно до рекомендацій ISO 25178 (Geometric Product Specifications), для ряду стандартизованих параметрів введено тривимірні аналоги, які точніше відображають властивості поверхні. У даній роботі

запропонована модифікація деяких параметрів, яка враховує нерегулярність вхідних даних.

Тривимірний аналог середньоарифметичного відхилення S_a – параметр визначаємо за формулою:

$$S_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\tilde{\tilde{F}}(x_i, y_i)|.$$

Середньоквадратичному відхиленню профілю відповідає тривимірний аналог:

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tilde{\tilde{F}}^2(x_i, y_i)}.$$

Максимальна абсолютна висота профілю S_p і мінімальна абсолютна висота профілю S_v у тривимірному випадку визначаються за формулами:

$$S_p = \text{MAX}_{i=1}^N (\tilde{\tilde{F}}(x_i, y_i)), \quad S_v = \left| \text{MIN}_{i=1}^N (\tilde{\tilde{F}}(x_i, y_i)) \right|$$

Значення параметрів S_p і S_v визначають положення двох екстремальних перетинів, розташованих паралельно горизонту – площини вершин і площини западин.

Найбільшому відхиленню профілю в тривимірному випадку відповідає параметр S_t , який обчислюється так:

$$S_t = S_p + S_v$$

Асиметрія й ексцес частотного розподілу в тривимірному відображенні обчислюються як:

$$S_{sk} = \frac{1}{NS_q^3} \sum_{i=1}^N \tilde{\tilde{F}}^3(x_i, y_i), \quad S_{su} = \frac{1}{NS_q^4} \sum_{i=1}^N \tilde{\tilde{F}}^4(x_i, y_i)$$

Замість параметра R_z у тривимірному відображенні вводиться аналогічний параметр для висоти нерівностей поверхні:

$$S_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{j=1}^5 \tilde{\tilde{F}}_{pj} + \sum_{j=1}^5 \tilde{\tilde{F}}_{vj} \right),$$

де $\tilde{\tilde{F}}_{pj}$ і $\tilde{\tilde{F}}_{vj}$, $j = 1 \dots 5$ – відповідно 5 найвищих виступів і 5 найглибших западин поверхні.

Важливе значення для визначення параметрів поверхні взірця мають гібридні параметри. Одним із основних гібридних параметрів поверхні є питоме змочування поверхні або коефіцієнт площі поверхні S_{dr} .

S_{dr} – це відношення площі поверхні до площі вибіркової області:

$$S_{dr} = \frac{S_{\text{sur}} - S_{XY}}{S_{XY}} \cdot 100\%,$$

де $S_{\text{sur}} = \sum_{i=1}^{N_t} S_{K_i}$ – оцінкою площі аналізованої поверхні матеріалу, яка рівна сумі площ трикутників нерегулярної сітки трикутників отриманої моделі поверхні, а S_{XY} – це площа базової площадки, в рамках якої здійснюється аналіз поверхні.

Відносна опорна довжина у тривимірному аналізі має свій відповідник – це опорна площина. Для розрахунку площі опорної поверхні на рівні p використовується формула

$$S_{ps} = \iint_{\tilde{F}(x,y) > F_p} dx dy$$

звідки отримуємо середнє значення опорної довжини:

$$t_{ps} = \frac{S_{ps}}{S_{sur}}.$$

Для розрахунку функціональних параметрів, які ґрунтуються на використанні опорної площини, запропоновано метод отримання опорної площини на основі побудови ізоліній поверхні. Ізолінія будується по точках перетину січною площиною $z = p$, перпендикулярною до вісі аплікату, з ребрами триангуляційної сітки моделі поверхні, для яких виконується нерівність:

$$(z_{p_i} - p)(z_{p_j} - p) \leq 0,$$

де z_{p_i}, z_{p_j} – аплікати кінців p_i і p_j аналізованого ребра відповідно.

Дані результати дозволили отримати оцінку важливих фрикційних параметрів поверхні.

Перший – це площа контактної взаємодії, яка обчислюється як площа багатокутників обмежених замкнутими контурами ізоліній:

$$S_{kb} = \sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{2} n \sum_{j=1}^{m_i} v_j \times v_{j+1} \right),$$

де V_j – вершини контура i -ї ізолінії; m_j – кількість вершин; k – кількість контурів; n – нормаль до площини ізолінії (рис.6).

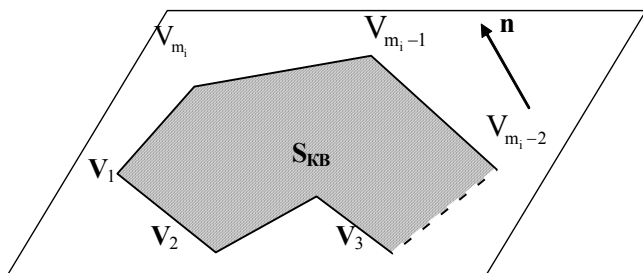


Рис. 6. Оцінка площі контактної взаємодії

Другий фрикційний параметр – це матеріальний об'єм на висоті p , який обчислюється як об'єм матеріалу між площиною вершин та опорною кривою на рівні p за формулою

$$V_m(p) = \iint_{\tilde{F}(x,y) > p} (\tilde{F}(x,y) - p) dS. \quad (8)$$

Крива відносного матеріального об'єму $V_{vi}(p)$:

$$0 \leq V_{vi}(p) = \frac{V_m(p)}{V_m(p_{min})} \leq 1,$$

де $V_{vi}(p_{min})$ – об'єм матеріалу на висоті мінімальної впадини.

Ця крива є інтегральним параметром, який дозволяє оцінити масову частку матеріалу, що піддався зношуванню.

Наступний фрикційний параметр – це маслоємність поверхні матеріалу на висоті p , яка обчислюється як об'єм пустот між площиною впадин та опорною кривою на рівні p за формулою

$$V_v(p) = \iint_{\tilde{F}(x,y) < p} (p - \tilde{F}(x,y)) dS. \quad (9)$$

Крива відносної маслоємності поверхні $V_{vi}(p)$:

$$0 \leq V_{vi}(p) = \frac{V_v(p)}{V_v(p_{max})} \leq 1:$$

де $V_{vi}(p_{max})$ – об'єм пустот на висоті максимального піку поверхні.

Ця крива характеризує загальний об'єм пор, які залишаються на поверхні, та динаміку в процесі зношування.

Інтеграли (8) та (9) можна шукати подібно до обчислення об'ємів (6) та (7), тобто переводячи нерегулярну сітку трикутників на дискретну регулярну сітку відліків. При цьому, очевидно, відбувається втрата точності, оскільки використовується інтерполяція. Саме тому при розрахунку (8) та (9) пропонується наступний метод.

Після побудови ізоліній поверхні отримані ребра ізолінії вносяться в процедури триангуляції у вигляді обмежень, тобто ребра ізолінії стають ребрами трикутників триангуляції. У такому випадку ми можемо однозначно визначити, які трикутники нерегулярної сітки моделі поверхні лежать над січною площиною $z = p$. Це дає змогу порахувати об'єм у такому вигляді:

$$V_m(p) = \sum_{\forall Z_{min}(K_i) \geq p} V_{K_i},$$

де V_{K_i} – об'єм елементарної зрізаної призми, який формується трикутником моделі поверхні та його проекцією на опорну площину; $Z_{min}(K_i)$ – функція визначення мінімальної висоти вершин тривимірного трикутника.

Аналогічно для

$$V_v(p) = \sum_{\forall Z_{max}(K_i) \leq p} V_{K_i},$$

де $Z_{max}(K_i)$ – функція визначення максимальної висоти вершин тривимірного трикутника.

5. Висновки

У роботі ставилася задача створення методів кількісного аналізу рельєфу поверхні, поданого у вигляді нерегулярної хмари точок. Відомі підходи для обчислення параметрів поверхні згідно з рекомендаціями ISO 25178 передбачають інтегрування по моделі поверхні в межах обраної прямокутної базової ділянки, що в дискретному вигляді перетворюється на подвійне суму-

вання на множині регулярних відліків поверхні. У даній роботі запропоновано підхід до розрахунку параметрів поверхні, який враховує нерегулярність вхідних даних, тобто використане одинарне сумування нерегулярних відліків із використанням топології поверхні, отриманої на етапі моделювання поверхні аналізованого взірця. Такий підхід підвищує точність розрахунку параметрів, оскільки немає необхідності переносити нерегулярні дані на регулярну сітку відліків.

Роздільна здатність запропонованого методу знаходиться на рівні 10 мкм, що дозволяє аналізувати поверхні до 3-го класу шорсткості включно. Точність методу на рівні 15 мкм. Очевидно, що роздільна здатність даного методу може бути підвищена за умови використання первинних даних про аналізовану поверхню, отриманих з іншого джерела, наприклад, із оптичного мікроскопа. Технічні характеристики багатьох мікроскопів вказують на те, що є можливість отримувати хмари точок з поверхні при різних коефіцієнтах збільшення, та більша частина з них на даний момент не забезпечена методами аналізу тривимірних параметрів поверхні. Новизна запропонованого методу полягає в забезпеченні цих приладів додатковою функціональністю тривимірного аналізу поверхонь.

Література: 1. *Варецький Я. Ю.* Створення цифрової моделі поверхонь зламів та конструкційних матеріалів для задач кількісного аналізу // Матеріали ХХ відкритої науково-техн. конференції молодих науковців і спеціалістів, КМН-2007. Львів: ФМІ ім. Г.В.Карпенка НАН України,

2007. С.214–217. 2. *Varetskyi Y.* Method of Analysis of Irregularly Spaced 3D Point Set // Proc. of International Conference “Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science” (TCSET’2008). Р. 344. 3. *Русин Б. П., Варецький Я. Ю., Лисак Ю. В., Похмурський А. Ю.* Реконструкція та кількісний аналіз металевих поверхонь з пітингами на основі удосконаленого методу погодження стереозображень // “Фізико-хімічна механіка матеріалів”. Львів. 2011. Том 47. №2. С.126-133. 4. *Huel S. V., Vandewalle J.* “The Total Least Squares Problem: Computational Aspects and Analysis”. SIAM, Philadelphia. 1991. 5. *Weidner A., Seewig J., Reithmeier E.* “Structure oriented 3D roughness evaluation with optical profilers” // T.Thomas, B. Rosen, H. Zahouani (Eds.), Proceedings of the 10th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, Saint-Etienne, France. 2005. Р.49–58. 6. *Кокин В. П., Кризберг Ю. Я., Руткс О. Я., Рудзит Я. А.* Микрофотографические исследования некоторых параметров шероховатости // Микрогеометрия и эксплуатационные свойства машин. 1975. Вып. 4. С. 57. 7. *Лукьянов В. С., Рудзит Я. А.* Параметры шероховатости поверхности. М. : Изд. стандартов, 1979. 162 с.

Надійшла до редколегії 07.06.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Путятін Є.П.

Варецький Ярема Юрійович, канд. техн. наук, ст. наук. співроб. Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАНУ. Наукові інтереси: обробка та розпізнавання зображень. Адреса: Україна, 79601, Львів, вул. Наукова, 5а, тел. 2296530, e-mail: jvaretskyi@ipm.lviv.ua.