МЕТОДИКА ТА ДЕЯКІ РЕЗУЛЬТАТИ ОЦІНЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ НА ПОВЕРХНІ СТАЛЬНИХ ЗРАЗКІВ З УРАХУВАННЯМ ПАРАМЕТРІВ ЇЇ МІКРОГЕОМЕТРІЇ

П.О. Марущак, Я.В. Литвиненко, І.Б. Окіпний

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

It was established that the roughness parameters are insensitive to the localization of stresses on the surface of parts and structures, since they does not take into account the radii of the microrelief depressions. A new automated algorithm for estimating the stress concentration coefficient of the radius of the recess, as one of the main parameters of the profile microgeometry according to the Arola–Ramulu model was proposed.

Ключові слова: шорсткість, концентрація напружень, мікрогеометрія, радіус надрізу

Вступ. Існує значна кількість функціональних властивостей поверхні, на які впливає її мікрогеометрія, це зокрема, циклічна довговічність [1]. Мікрогеометрію зразків та конструкцій описують параметрами шорсткості. Для повного опису профілю поверхні, як випадкової величини необхідно від 3 до 25 параметрів [2], але, зазвичай шорсткість нормують за *Ra* або *Rz*.

З низки праць відомо, що стандартні параметри шорсткості інколи є малочутливими для оцінювання фізико-механічних властивостей матеріалів та достовірного опису параметрів мікронерівностей поверхонь [3]. Зокрема, для розрахунку концентрації напружень на поверхні, слід враховувати геометрію радіусів заглибин мікрорельєфу, а самі заглибини розглядати як концератори – мікронадрізи [4]. Проте, з інженерної точки зору, цей підхід потребує автоматизації та розвитку, з метою забезпечення відтворюваності та достовірності результатів.

Сучасні підходи аналізу стану поверхонь ґрунтуються переважно на морфологічних особливостях мікронерівностей. Їх методичною перевагою є автоматична реалізація, а аналіз ґрунтується на методах математичного моделювання. Відомі нові методи та програмні комплекси, які дозволяють комп'ютеризовано оцінювати мікрогеометрію поверхонь з допомогою графічних критеріїв, що створює можливості для оптимізації мікрогеометрії виробів [2, 3]. Проте, загалом, розвиток методів порівняльного оцінювання впливу мікрогеометрії поверхні на локалізацію напружень та механізми зародження тріщин потребує подальшого розвитку. Це особливо важливо для трубних сталей пошкоджених біокорозією, коли вплив корозійних процесів ще є «незначним», відбувається на мікрорівні.

В даній роботі розвинено метод та створено програмне забезпечення для автоматизованого оцінювання впливу шорсткості поверхні та мікрогеометрії радіусів западин профілю на значення коефіцієнта концентрації напружень.

Методика оцінювання концентрації напружень. Зростання корозійної пошкодженості поверхні трубних сталей після біокорозії зумовлює зміну шорсткості. Це може спричинити зниження їх циклічної довговічності. Тому оцінювали шорсткість зразків у вихідному стані та після випробувань у біокорозійному середовищі за середньою шорсткістю (Ra), максимальним значенням вершин та западин рельєфу (Ry) або шорсткістю за 10 точками (Rz) топографії поверхні. Параметри шорсткості поверхонь визначали згідно стандарту на шорсткість ГОСТ 2789-73

Ефективний коефіцієнт концентрацій напружень $\left(\overline{K_t}\right)$ для кородованих поверхонь визначали з урахуванням геометрії западин профілю, зокрема середнього радіусу за формулою [4]:

$$\overline{K_t} = 1 + n\left(\frac{R_a}{\overline{\rho}}\right)\left(\frac{R_y}{R_z}\right) \qquad (1)$$

де $\overline{\rho}$ - середній радіус заглибин профілю; n – коефіцієнт урахування типу навантаження (n =2 за статичного розтягу);

Обчислювали ефективний втомний коефіцієнт концентрацій напружень ($\overline{K_f}$), який пов'язаний з $\overline{K_t}$ [4]

$$\overline{K_f} = 1 + q(\overline{K_t} - 1) \qquad (2)$$

Чутливість до концентрації напружень *(q)* оцінювали через ефективний радіус западини профілю поверхні ($\overline{\rho}$) [4]

$$q = \frac{1}{(1 + \gamma/\overline{\rho})} \qquad (3)$$

де γ - стала матеріалу, яка враховує умовну межу міцності $\sigma_в$ [4].

Взаємозв'язок пошкодження з шорсткістю поверхні. На рис. 1 приведено профілограму шорсткості зразка сталі 17Г1С-У. На профілограмі добре видно нерівності рельєфу, зокрема западини рельєфу, які є основними концентраторами напружень [4, 5].

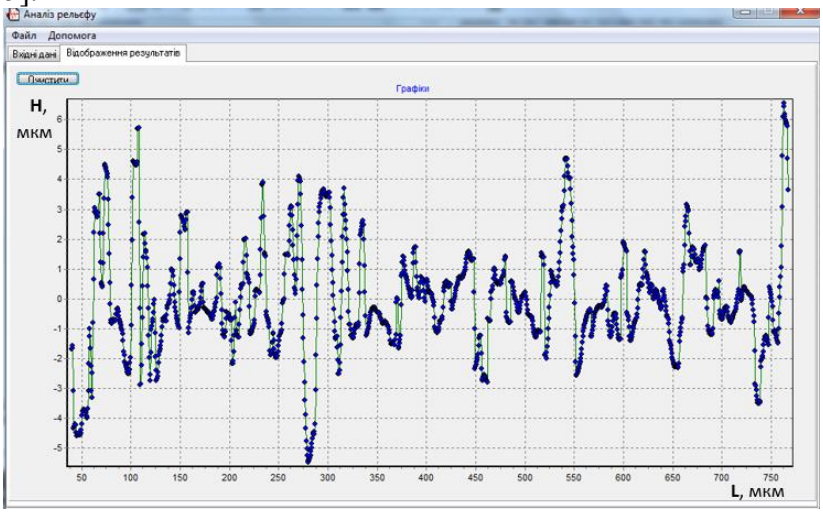

Рис. 1. Профілограма поверхні зразків сталі 17Г1С-У на якій проведено апробацію пропонованого автоматизованого методу

В межах довжини (L) аналізованої ділянки оцінювали параметри шорсткості поверхні, при цьому $L = \Delta t \cdot N$, де Δt - крок дискретизації. Обчислення параметрів шорсткості проводили від базової лінії, якою обрано середню лінію H_{aver}, що мала форму базового профілю та була проведена таким чином, щоб у межах аналізованої довжини середнє квадратичне відхилення профілю від цієї лінії було мінімальним.

$$H_{\text{aver}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} H_i \qquad (4)$$

Середнє арифметичне відхилення профілю *Ra* визначали усередненням абсолютних значень відхилень в межах базової довжини

$$R_{\text{a}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} |H_i| \qquad (5)$$

N - кількість дискретних відліків профілограми; H_i - i -ті значення профілограми.

Також обчислювали максимальну висоту профілю, як суму максимальної глибини западин та виступів профілю

$$R_{\text{y}} = |H_{\max} - H_{\min}|; \qquad (6)$$

$H_{\max}$- максимальне значення висоти вершини профілограми; $H_{\min}$ - мінімальне значення западини профілограми.

Визначали *Rz*, як суму середніх абсолютних значень висоти п’яти найбільших виступів і глибин п’яти найглибших западин профілю в межах базової довжини

$$R_z = \frac{1}{5}\left[\sum_{i=1}^{5}(H_i)_{\max} + \sum_{i=1}^{5}\left|(H_i)_{\min}\right|\right] \qquad (7)$$

$(H_i)_{\max}$ - п’ять локальних максимумів (вершин) профілограми; $(H_i)_{\min}$ - п’ять локальних мінімумів (западин) профілограми;

З метою оцінювання концентрації напружень на мікрогеометрії профілю визначали ρ – радіус заглибини, на основі попередньо обчислених значень її максимальної глибини. Проведено програмний «зріз» профілю западини на відстані $0{,}35 \cdot H_{min}$ [5]. Одержані значення усереднили та одержали значення приведеного радіусу 5-ти найглибших западин.

$$\overline{\rho} = \frac{1}{5}\sum_{i=1}^{5}\rho_{i\min}$$

Приклад програмної реалізації цього методу подано нижче, рис. 2.

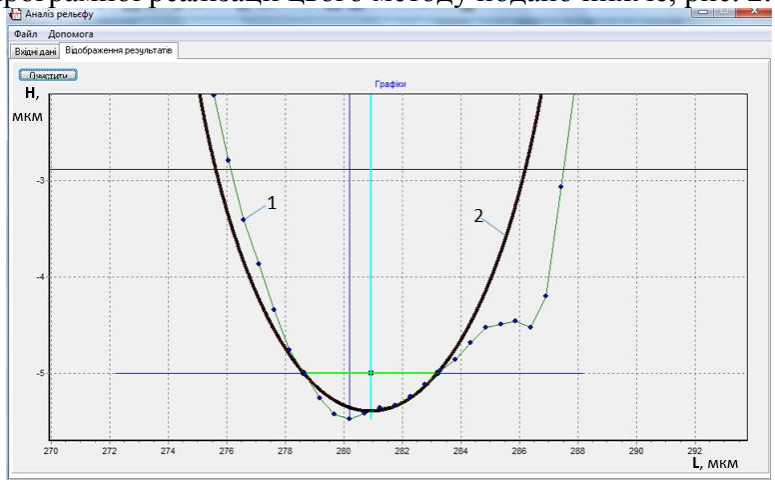

Рис. 2. Результат обчислення радіусу западин мікрорельєфу поверхні зразка сталі 17Г1С-У: 1 – дані профілометрії; 2 – результати розрахунку.

Проведено низку програмних «зрізів» профілів западин, за якими визначено координати точок лівої та правої межі хорд, необхідних для обчислення радіусів «западин»

$$(\overline{H}_i)_{\min} = (H_i)_{\min} + 0.35 \cdot R_a,\ i = \overline{1,5}$$

Координати точок меж хорд для «западин» $(\overline{L}_i)_{left\,\min}, (\overline{L}_i)_{right\,\min},\ i = \overline{1,5}$

Довжини хорд для «западин» рельєфу

$$l_{i\min} = (\overline{L}_i)_{right\,\min} - (\overline{L}_i)_{left\,\min},\ i = \overline{1,5}$$

Координата пошуку умовних локальних екстремумів для «западин» рельєфу $(\overline{H}_i)_{aver\min}$

$$l_{i\,aver\min} = \left[(\overline{L}_i)_{right\,\min} - (\overline{L}_i)_{left\,\min}\right]/2$$

Висоти від хорд до умовних локальних екстремумів для «западин» рельєфу

$$h_{i\min} = (\overline{H}_i)_{aver\min} - (\overline{H}_i)_{\min},\ i = \overline{1,5}$$

Визначені радіуси для «западин» рельєфу

$$\rho_{i\min} = \frac{h_{i\min}}{2} + \frac{l_{i\min}^{\ 2}}{8 \cdot h_{i\min}},\ i = \overline{1,5}$$

На рис. 3 подано результати кількісного оцінювання мікрогеометрії плоских поверхонь досліджених зразків сталі 17Г1С-У за допомогою приладу 3D Optical Surface Metrology System Leica DCM8 та обчислено значення коефіцієнтів K_t та K_f. Перевагою

цього методу є те, що можна обробляти западини практично будь-якої рельєфної складності.

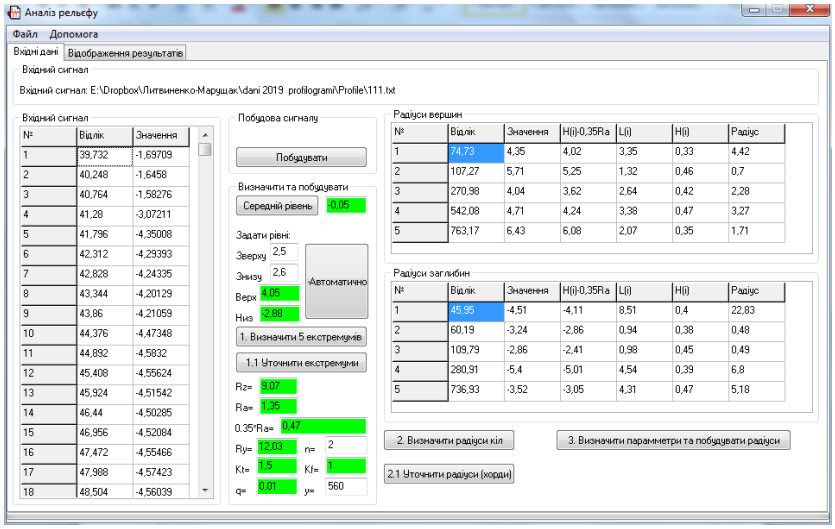

Рис. 3. Результат обчислення концентрації напружень мікрорельєфу поверхні зразка сталі 17Г1С-У, з урахуванням радіусів заглибин

Проаналізовано та описано морфологічну структуру поверхні досліджених зразків на основі оцінювання морфометричних характеристик мікронерівностей. Це дозволило одержати наступні результати:

- за аналізом шорсткості поверхонь та даних профілограм, враховано вплив форми западин профілю на локалізацією напружень в околі таких дефектів;

- для автоматизації досліджень мікрогеометрії зразків створено алгоритм та програмний комплекс, який забезпечує оцінювання параметрів мікронерівностей профілю аналізованих поверхонь, зокрема радіусів западин рельєфу.

Висновки

Розроблено алгоритм та програмне забезпечення оцінювання параметрів шорсткості поверхні матеріалів. Проаналізовано профілі рельєфу поверхні зразків сталі 17Г1С-У, виявлено основні закономірності впливу морфології поверхні на коефіцієнти концентрації напружень. Обчислено значення ефективних коефіцієнтів концентрації напружень (K_t, K_f) за формулою Ароли – Рамулу для тестової поверхні.

Література

1. Контроль качества поверхности деталей с использованием бесконтактного профилометра / С.Р. Игнатович, И.М. Закиев, В.И. Закиев // Авиационно-космическая техника и технология. - 2006. - N 8. - С. 20-23.
2. Валетов В.А., Филимонова Е.А. Применение непараметрических критериев для оценки микрогеометрии при импульсном фрезеровании // Изв. вузов. Приборостроение. - 2014. - Т. 57. - № 8. - С. 52-54.
3. Филимонова Е.А. Разработка методики и программы автоматизированного контроля микрогеометрии поверхностей деталей приборов с помощью графических критериев и их использование в технологических исследованиях: дис ... канд. техн. наук. СПб: НИУ ИТМО, 2014. - 125 с.
4. Arola D., Williams C.L.Estimating the fatigue stress concentration factor of machined surfaces, International Journal of Fatigue. - 2002. - 24(9). - P. 923-930.
5. Крагельский И.В., Рудзит Я.А. Методика определения средних значений радиусов закругления вершин неровностей профиля шероховатости // Приборостроение. - 1968. - № 3. - С. 15-24.