

УДК 681.786: 535.41

## КОРЕЛЯЦІЙНА ОЦІНКА КОРОЗІЙНИХ ВИРАЗОК НА ШОРСТКІЙ ПОВЕРХНІ

Л. Франкевич

*Фізико-механічний інститут НАН України,  
вул. Наукова, 5, 79601, Львів, Україна.  
frankevych@ipm.lviv.ua*

Для дослідження процесів появи корозійних виразок та тріщиноутворення на поверхнях металів запропоновано використання градуовального співвідношення для шорстких поверхонь. На тестових спекл-зображеннях виконано попереднє математичне моделювання процесів появи та росту корозійних виразок. Отримані градуовальні залежності дали змогу зменшити похибку визначення локалізації та площі корозійних виразок за допомогою методу просторово-часової спекл-кореляції.

*Ключові слова:* корозійні виразки, тріщиноутворення, спекл-зображення, кореляційний коефіцієнт.

Оцінка розвитку мікроефектів як первинних джерел зародження процесів руйнування матеріалу є важливим компонентом проблеми технічної діагностики відповідальних конструкцій тривалої експлуатації. Одними з таких мікроефектів, що доволі часто трапляються на поверхнях елементів конструкцій, є корозійні виразки (пітинги) – заглиблення на поверхні металу, природа якого може бути як механічна (вм'ятини), так і фізико-хімічна (корозія) [1]. Корозійні виразки є ефективними концентраторами механічних напружень, які під дією експлуатаційних навантажень спричиняють подальшу мікропошкоджуваність матеріалу в їхньому оточенні (зони пластичного деформування та розшарування), і зумовлюють виникнення поверхневих тріщиноподібних дефектів.

Для дослідження цього виду корозії сьогодні є низка методів, які умовно можна розділити на контактні та безконтактні [2–3]. Головною перевагою безконтактних є можливість проведення досліджень у реальному масштабі часу. Одночасно для ефективного прогнозування ресурсу матеріалу потрібно використовувати методи, які дають змогу аналізувати початкові стадії утворення корозійних виразок, тобто зародження і початок їхнього росту. Зокрема, метод цифрової спекл-кореляції допомагає безконтактно моніторити процеси зародження пітингів, а також їхній ріст [4, 5]. Суть методу полягає в такому: ділянку оптично шорсткої поверхні металу освітлюють когерентним лазерним променем, і внаслідок багатопроменевої інтерференції відбитих від поверхні оптичних хвиль об'єктивом цифрової камери формується спекл-зображення, що дає інформацію про стан освітленої ділянки поверхні; після реєстрації цифровою

камерою спекл-зображення вводять у комп'ютер; через заданий проміжок часу реєструють друге спекл-зображення, у якому фіксуються всі зміни, що відбулися з поверхнею. Якщо за проміжок часу між записом двох сусідніх зображень відбулось утворення чи збільшення вже наявних пітингів, то, порівнюючи спекл-зображення, можна обчислити, на скільки збільшилася площа пітингів за заданий проміжок часу. Щоб порівняти два зображення, застосовують крос-кореляцію першого і другого спекл-зображень. Унаслідок реалізації такої процедури формується кореляційний пік, інтенсивність якого тим менша, чим більшою була пітингова корозія на вибраній ділянці поверхні. Завдяки цьому за інтенсивністю кореляційних піків можна оцінювати збільшення площі корозійних виразок на вибраній ділянці досліджуваної поверхні.

**Градуювальне співвідношення.** Для зменшення похибки визначення площі пітингів за допомогою методу просторово-часової спекл-кореляції на фрагментах ділянки поверхні проводили попереднє математичне моделювання процесів появи та росту пітингів на отриманих спекл-зображеннях. Таке моделювання проводять як градувальну процедуру для кожного досліджуваного зразка, оскільки поверхні зразків можуть мати специфічні відмінності, що впливають на спекл-зображення.

Локальні рівняння, що описують спекл-зображення взаємодії лазерного пучка з шорсткою поверхнею, освітленою лазером без опорного променя, можна записати так:

$$I_i = I_0 + I_0 \cos \varphi_i, \quad 0 \leq i \leq S_{I-1} \quad (1)$$

де  $I_0$  – інтенсивність лазерного променя;  $\varphi_i$  – випадкова фазова складова, зумовлена мікрорельєфом поверхні;  $S_I$  – площа спекл-зображення в пікселях.

Модель  $\mathbf{X} = (X_0, X_1, \dots, X_{S_{I-1}})$  спекл-зображення поверхні без корозійних виразок

$$X_i = I_0 + I_0 \cos \varphi_i, \quad 0 \leq i \leq S_{I-1}. \quad (2)$$

Модель  $\mathbf{Y} = (Y_0, Y_1, \dots, Y_{S_{I-1}})$  спекл-зображення поверхні у випадку, коли сумарна площа пітингів становить  $S_p$  пікселів

$$Y_i = \begin{cases} 0, & \text{для } 0 \leq i \leq S_{p-1}; \\ I_0 + I_0 \cos \varphi_i, & \text{для } S_p \leq i \leq S_{I-1}. \end{cases}, \quad 0 \leq S_p \leq S_{I-1}. \quad (3)$$

Оцінку **PQ** (Pit Quantity) пітингової корозії запропоновано проводити так:

$$\mathbf{PQ} = 1 - \rho(\mathbf{X}, \mathbf{Y}), \quad (4)$$

де  $\rho(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$  – коефіцієнт кореляції спекл-зображень  $\mathbf{X}$  і  $\mathbf{Y}$ , тобто

$$\rho(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \frac{\langle (X_i - \langle X_i \rangle)(Y_i - \langle Y_i \rangle) \rangle}{\sigma_X \sigma_Y}. \quad (5)$$

За допомогою наведених вище моделей спекл-зображень розглянемо запропонований спосіб оцінювання корозії детальніше.

Середні значення  $\langle X_i \rangle$  і  $\langle Y_i \rangle$  інтенсивностей для спекл-зображень (2) і (3), відповідно, такі:

$$\langle X_i \rangle = \frac{1}{S_I} \left( \sum_{S_p}^{S_{I-1}} I_i + \sum_0^{S_p-1} I_i \right) = I_0 + \frac{I_0}{S_I} \left( \sum_{S_p}^{S_{I-1}} \cos \varphi_i + \sum_0^{S_p-1} \cos \varphi_i \right); \quad (6)$$

$$\langle Y_i \rangle = \frac{1}{S_I} \left( \sum_{S_p}^{S_{I-1}} I_i \right) = \frac{(S_I - S_P)}{S_I} I_0 + \frac{I_0}{S_I} \left( \sum_{S_p}^{S_{I-1}} \cos \varphi_i \right). \quad (7)$$

Флуктуації  $(X_i - \langle X_i \rangle)$  інтенсивностей щодо середнього значення на спекл-зображенні (2)

$$(X_i - \langle X_i \rangle) = I_0 \cos \varphi_i - \frac{I_0}{S_I} \left( \sum_{S_p}^{S_{I-1}} \cos \varphi_i + \sum_0^{S_{P-1}} \cos \varphi_i \right). \quad (8)$$

Флуктуації  $(Y_i - \langle Y_i \rangle)$  інтенсивностей щодо середнього значення на спекл-зображенні (3)

$$(Y_i - \langle Y_i \rangle) = \begin{cases} -\frac{(S_I - S_P)}{S_I} I_0 - \frac{I_0}{S_I} \left( \sum_{S_p}^{S_{I-1}} \cos \varphi_i \right), & 0 \leq i \leq S_{P-1} \\ \frac{S_P}{S_I} I_0 + I_0 \cos \varphi_i - \frac{I_0}{S_I} \left( \sum_{S_p}^{S_{I-1}} \cos \varphi_i \right), & S_P \leq i \leq S_{I-1} \end{cases}. \quad (9)$$

Спільні флуктуації інтенсивностей на спекл-зображеннях **X** та **Y** такі:

$$(X_i - \langle X_i \rangle)(0 - \langle Y_i \rangle) = I_0^2 \left\{ -\frac{(S_I - S_P)}{S_I} \cos \varphi_i - \frac{1}{S_I} \cos \varphi_i \left( \sum_{S_p}^{S_{I-1}} \cos \varphi_i \right) + \frac{(S_I - S_P)}{S_I^2} \left( \sum_0^{S_{I-1}} \cos \varphi_i \right) + \frac{1}{S_I^2} \left( \sum_{S_p}^{S_{I-1}} \cos \varphi_i \right) \left( \sum_0^{S_{I-1}} \cos \varphi_i \right) \right\}; \quad (10)$$

$$(X_i - \langle X_i \rangle)(Y_i - \langle Y_i \rangle) = I_0^2 \left[ \frac{S_P}{S_I} \cos \varphi_i + \cos^2 \varphi_i - \frac{1}{S_I} \cos \varphi_i \left( \sum_{S_p}^{S_{I-1}} \cos \varphi_i \right) - \frac{S_P}{S_I^2} \left( \sum_0^{S_{I-1}} \cos \varphi_i \right) - \frac{1}{S_I} \cos \varphi_i \left( \sum_0^{S_{I-1}} \cos \varphi_i \right) + \frac{1}{S_I^2} \left( \sum_{S_p}^{S_{I-1}} \cos \varphi_i \right) \left( \sum_0^{S_{I-1}} \cos \varphi_i \right) \right]. \quad (11)$$

Коваріація інтенсивностей спекл-зображень (2) і (3)

$$\frac{1}{S_I} \left[ \sum_0^{S_{P-1}} (X_i - \langle X_i \rangle)(0 - \langle Y_i \rangle) + \sum_{S_P}^{S_{I-1}} (X_i - \langle X_i \rangle)(Y_i - \langle Y_i \rangle) \right] = \frac{I_0^2}{S_I} \left\{ \sum_{S_p}^{S_{I-1}} \cos^2 \varphi_i - \sum_0^{S_{P-1}} \cos \varphi_i + \frac{1}{S_I} \left( \sum_0^{S_{I-1}} \cos \varphi_i \right) \left[ S_P - \sum_{S_p}^{S_{I-1}} \cos \varphi_i \right] \right\}. \quad (12)$$

Дисперсія інтенсивностей спекл-зображення (2)

$$\sigma_X^2 = \frac{1}{S_I} \sum_0^{S_{I-1}} (X_i - \langle X_i \rangle)^2 = \frac{I_0^2}{S_I} \left[ \sum_0^{S_{I-1}} \cos^2 \varphi_i - \frac{1}{S_I} \left( \sum_0^{S_{I-1}} \cos \varphi_i \right)^2 \right]. \quad (13)$$

Дисперсія інтенсивностей спекл-зображення (3)

$$\sigma_Y^2 = \frac{1}{S_I} \left[ \sum_0^{S_p-1} (0 - \langle Y_i \rangle)^2 + \sum_{S_p}^{S_I-1} (Y_i - \langle Y_i \rangle)^2 \right], \quad (14)$$

де

$$\begin{aligned} & \frac{1}{S_I} \sum_0^{S_p-1} (0 - \langle Y_i \rangle)^2 = \\ & = \frac{I_0^2}{S_I} \left[ \frac{S_p}{S_I^2} (S_I - S_p)^2 + \frac{2S_p}{S_I} \left( \sum_{S_p}^{S_I-1} \cos \varphi_i \right) - \frac{2S_p^2}{S_I^2} \left( \sum_{S_p}^{S_I-1} \cos \varphi_i \right) + \frac{S_p}{S_I^2} \left( \sum_{S_p}^{S_I-1} \cos \varphi_i \right)^2 \right], \end{aligned}$$

а

$$\begin{aligned} \frac{1}{S_I} \sum_{S_p}^{S_I-1} (Y_i - \langle Y_i \rangle)^2 &= \frac{I_0^2}{S_I} \left[ \frac{S_p^2 (S_I - S_p)}{S_I^2} + \frac{2S_p^2}{S_I^2} \left( \sum_{S_p}^{S_I-1} \cos \varphi_i \right) + \sum_{S_p}^{S_I-1} \cos^2 \varphi_i - \right. \\ & \left. - \frac{1}{S_I} \left( \sum_{S_p}^{S_I-1} \cos \varphi_i \right)^2 - \frac{S_p}{S_I^2} \left( \sum_{S_p}^{S_I-1} \cos \varphi_i \right)^2 \right]. \end{aligned}$$

Після підстановки наведених виразів у (13) отримаємо

$$\sigma_Y^2 = \frac{I_0^2}{S_I} \left[ S_p \left( 1 - \frac{S_p}{S_I} \right) + \sum_{S_p}^{S_I-1} \cos^2 \varphi_i + \frac{2S_p}{S_I} \left( \sum_{S_p}^{S_I-1} \cos \varphi_i \right) - \frac{1}{S_I} \left( \sum_{S_p}^{S_I-1} \cos \varphi_i \right)^2 \right]. \quad (15)$$

Стандартні відхилення інтенсивностей на спекл-зображеннях (2) і (3)

$$\sigma_X = \frac{I_0}{\sqrt{S_I}} \sqrt{\sum_0^{S_p-1} \cos^2 \varphi_i - \frac{1}{S_I} \left( \sum_0^{S_p-1} \cos \varphi_i \right)^2} \quad (16)$$

та

$$\sigma_Y = \frac{I_0}{\sqrt{S_I}} \sqrt{\sum_{S_p}^{S_I-1} \cos^2 \varphi_i - \frac{1}{S_I} \left( \sum_{S_p}^{S_I-1} \cos \varphi_i \right)^2 + \frac{2S_p}{S_I} \left( \sum_{S_p}^{S_I-1} \cos \varphi_i \right) + S_p \left( 1 - \frac{S_p}{S_I} \right)}. \quad (17)$$

Отже,

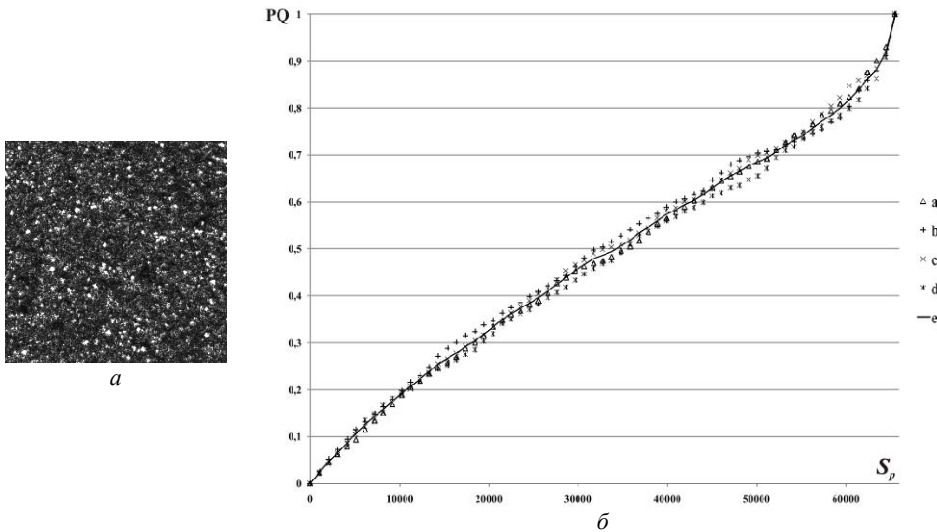
$$\begin{aligned} & \mathbf{PQ} = 1 - \\ & \frac{\sum_{S_p}^{S_I-1} \cos^2 \varphi_i - \sum_0^{S_p-1} \cos \varphi_i + \frac{1}{S_I} \left( \sum_0^{S_p-1} \cos \varphi_i \right) \left( S_p - \sum_{S_p}^{S_I-1} \cos \varphi_i \right)}{\sqrt{\sum_0^{S_p-1} \cos^2 \varphi_i - \frac{1}{S_I} \left( \sum_0^{S_p-1} \cos \varphi_i \right)^2} \sqrt{\sum_{S_p}^{S_I-1} \cos^2 \varphi_i - \frac{1}{S_I} \left( \sum_{S_p}^{S_I-1} \cos \varphi_i \right)^2 + \frac{2S_p}{S_I} \left( \sum_{S_p}^{S_I-1} \cos \varphi_i \right) + S_p \left( 1 - \frac{S_p}{S_I} \right)}}. \quad (18) \end{aligned}$$

Якщо взяти до уваги те, що значення доданка  $\sum_0^{S_p-1} \cos \varphi_i$  прямує до 0 [6], то формулу

(18) можна спростити:

$$PQ = 1 - \frac{\sum_{S_p}^{S_{I-1}} \cos^2 \phi_i - \sum_0^{S_{p-1}} \cos \phi_i}{\sqrt{\sum_0^{S_{I-1}} \cos^2 \phi_i} \sqrt{\sum_{S_p}^{S_{I-1}} \cos^2 \phi_i - \frac{1}{S_I} \left( \sum_{S_p}^{S_{I-1}} \cos \phi_i \right)^2} + \frac{2S_p}{S_I} \left( \sum_{S_p}^{S_{I-1}} \cos \phi_i \right) + S_p \left( 1 - \frac{S_p}{S_I} \right)} \quad (19)$$

**Експериментальні дослідження.** Під час експериментальних досліджень шорсткої поверхні металу, що зазнає виразкової корозії, спочатку потрібно зафіксувати початкове (тестове) спекл-зображення (див. рисунок, *a*), для якого за співвідношенням (19) будують градувальну криву залежності коефіцієнта PQ від площі корозійної виразки  $S_p$ . (див. рисунок, *б*, залежність *a*). Оскільки місце появи корозійної виразки на досліджуваній поверхні є довільним, під час обчислення PQ виникають похибки, пов'язані з неоднорідністю освітлення поверхні, а також зі зміною статистичних характеристик поверхні на досліджуваній ділянці. Щоб зменшити вплив цих похибок, для тестового зображення будують чотири градувальні криві, що відповідають повороту тестового зображення на 0, 90, 180 та 270 градусів (див. рисунок, *б*, залежності *a*, *b*, *c* і *d*, відповідно). На підставі отриманих експериментальних результатів будують графічну залежність середнього значення коефіцієнта PQ від загальної площі корозійних виразок на досліджуваному фрагменті шорсткої поверхні (див. рисунок, *б*, крива *e*), а також визначають середнє квадратичне відхилення значень коефіцієнта PQ.



Градувальні криві залежності коефіцієнта PQ від площі корозійної виразки.

На рисунку, *a* показано фрагмент тестового спекл-зображення шорсткої поверхні металу, його розмір становив 256 на 256 пікселів, на рисунку, *б* – чотири градувальні криві залежності коефіцієнта PQ від загальної площі корозійних

виразок на наведеному фрагменті. Криві *a*, *b*, *c* і *d* відповідають повороту тестового спекл-зображення на 0, 90, 180 та 270 градусів, відповідно. Далі будували залежність середнього значення коефіцієнта PQ та визначили середнє квадратичне відхилення від середнього значення коефіцієнта PQ (крива *e* на рисунку, *б*). Як бачимо, під час експериментальних досліджень методом просторово-часової спекл-кореляції, сумішивши значення кореляційного коефіцієнта з градуовальною кривою, ми можемо визначити загальну площу корозійних виразок на вибраному фрагменті.

Отже, визначено градуовальне співвідношення для кореляційної оцінки виразкової корозії на поверхні металів. Це співвідношення дає змогу оцінити зміну кореляційних коефіцієнтів, отриманих методом просторово-часової спекл-кореляції, з подальшим визначенням площі корозійних виразок та можливістю визначення динаміки росту цих виразок у реальному масштабі часу.

1. Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. посібник / Під заг. ред. В.В. Панасюка. Том 7: Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування / І.М. Дмитрах, А.Б. Вайнман, М.Г. Сташук, Л. Тот. Під ред. І.М. Дмитраха. – К.: Видавничий дім НАН України „Академперіодика”, 2005. – 378 с.
2. *Fricke-Begermann T., Gülker G., Hinsch K.D., Wolff K.* Corrosion monitoring with speckle correlation // *Appl. Opt.* – 1999. – Vol. 38, № 28. – P. 5948–5955.
3. *Hinsch K.D., Fricke-Begermann T., Gülker G., Wolff K.* Speckle correlation for the analysis of random processes at rough surfaces // *Opt. Las. Eng.* – 2000. – Vol. 33, N 2. – P. 87–105.
4. *Сиротюк А., Муравський Л., Куць О.* Дослідження мікропошкоджуваності матеріалу та зародження тріщин в околі пітингу методом просторово-часової спекл-кореляції // *Машинознавство.* – 2008. – № 5 (131). – С. 8–11.
5. *Франкевич Л.Ф., Муравський Л.І.* Дослідження процесів пітингової корозії на поверхні зразка під дією втомного навантаження методом просторово-часової спекл-кореляції // *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології.* – 2009. – № 1 (17). – С. 193–196.
6. *Вороняк Т. І., Кметь А. Б., Личак О. В.* Фазозсувна спекл-інтерферометрія з одноразовим зсувом фази // *Фіз.-хім. мех. матеріалів.* – 2007. – Т. 43, № 4. – С. 93–102.

## **CORRELATION ESTIMATION OF THE PITTING CORROSION ON THE ROUGH SURFACE**

**L. Frankevych**

*Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS Ukraine,  
Naukova 5, 79601 Lviv, Ukraine.  
frankevych@ipm.lviv.ua*

For the investigation of the pitting and cracking formation on the metal surface we suggested to use graded ratio for rough surfaces. Preliminary mathematical modeling of the pitting formation and its growth was performed on test speckle-patterns. Calculated graded ratio allows us to reduce the error in determining the pitting location and its area when we use the method of spatial-temporal speckle correlation technique.

*Key words:* pitting, crack formation, speckle-pattern, correlation coefficient.

## **КОРРЕЛЯЦИОННОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ЯЗВЕННОЙ КОРРОЗИИ НА ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ**

**Л. Франкевич**

*Физико-механический институт НАН Украины,  
ул. Научная, 5, 79601, Львов, Украина.  
frankevych@ipm.lviv.ua*

Для исследования процессов образования язв и трещин на поверхностях металлов предложено использование градуированного соотношения для шероховатых поверхностей. На тестовых спекл-изображениях проводили предварительное математическое моделирование процессов образования и роста коррозионных язв. Рассчитанные градуированные соотношения позволили уменьшить ошибку определения местоположения и площади коррозионных язв при помощи метода пространственно-временной спекл-корреляции.

*Ключевые слова:* коррозионные язвы, трещинообразование, спекл-изображения, корреляционный коэффициент.

Стаття надійшла до редколегії 29.04.2011

Прийнята до друку 31.05.2011