

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЛОКАЛЬНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ПОВЕРХНІ НА АМПЛІТУДУ КОРЕЛЯЦІЙНОГО СИГНАЛУ У ПРОЦЕСІ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ

The model of a correlation signal for non-coherent speckles is offered and quantitative ratio between value of deformations and amplitude of cross-correlation peak with taking into account the dimension of non-coherent speckles and their quantities in an image fragment are established.

**Key words:** *non-coherent speckles, deformation, image fragment, cross-correlation.*

Запропоновано модель кореляційного сигналу для некогерентних спеклів, визначено кількісні співвідношення між величиною деформацій та амплітудою піка крос-кореляції з урахуванням розмірів некогерентних спеклів та їх кількості у фрагменті зображення.

**Ключові слова:** *некогерентні спекли, деформації, фрагменти зображення, крос-кореляція.*

В експериментальній механіці для визначення деформацій [3], критичного розкриття тріщини [6], коефіцієнтів інтенсивності напружень [5], розмірів зони передруйнування [1] та інших параметрів широко використовують методи кореляційного порівняння фрагментів спекл-зображень поверхні досліджуваного зразка, які отримують у разі різних впливів. У випадку, коли фрагменти зображень просто зміщуються один відносно другого, цю величину зміщення ( $\Delta x, \Delta y$ ) можна визначити, відслідковуючи положення максимуму функції автокореляції цих фрагментів.

Для лазерних спеклів функцію автокореляції інтенсивності прямокутної ділянки визначають так [4]:

$$R_s(\Delta x, \Delta y) = \bar{I}^2 [1 + \gamma_s], \quad (1)$$

де  $\gamma_s = \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta x}{d}\right) \cdot \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta y}{d}\right)$  – коефіцієнт кореляції (квадрат нормалізованого комплексного коефіцієнта когерентності інтенсивності);  $d$  – характерний поперечний розмір спеклів (половина ширини нормованого піка автокореляції на рівні 0,5 від максимального значення);  $\bar{I}^2$  – квадрат середньої інтенсивності спеклів у фрагменті.

Одновимірний вигляд нормованої функції автокореляції (1) для зміщення  $\Delta x = -1$  показано на рис. 1.

Таким способом визначивши відносні переміщення всіх фрагментів зображення, можна побудувати поле переміщень і розрахувати деформації поверхні зразка. При такому підході припускають, що в межах фрагмента величиною деформацій можна нехтувати. Це справедливо, коли між двома зображеннями поверхні відбулися незначні деформації зразка.

Якщо під дією зовнішнього впливу поверхня матеріалу буде сильно деформуватись, або суттєво змінюватиметься її шорсткість, що часто спостерігається в зоні передруйнування, у цьому випадку відбудуться значні зміни у формі функції автокореляції фрагментів (1). Ця функція стане функцією крос-кореляції фрагментів і міститиме інформацію про зміни стану поверхні матеріалу, які відбулися під дією зовнішніх чинників.

У процесі кореляційної обробки цифрових зображень, які отримують з когерентними джерелами світла, спостерігається суттєве зменшення інтенсивності крос-кореляційного піка зі збільшенням деформацій досліджуваної поверхні, що негативно впливає на точність визначення переміщень фрагментів. Відбувається декореляція спеклів, зумовлена відносним зміщенням фрагментів  $S_{\Sigma} = S \cap S'$ , деформаціями фрагментів та їх взаємним поворотом на деякий кут  $\omega$  (рис. 2). Дослідження впливу коефіцієнта кореляції  $\gamma_s$ , фактору деформацій  $\varepsilon$  та відносних зміщень фрагментів  $S_{\Sigma}$  на точність вимірювання координат піка крос-кореляції, залежно від кута повороту  $\omega$ , для лазерних спеклів свідчать, що найбільший вплив має коефіцієнт кореляції  $\gamma_s$  [7].

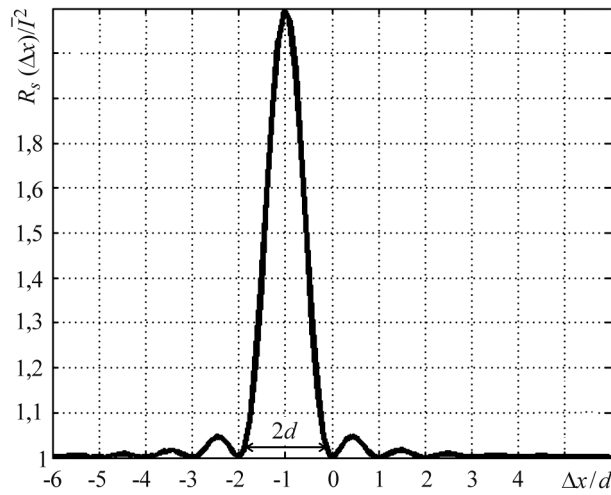


Рис. 1. Функція автокореляції зміщених фрагментів зображень.

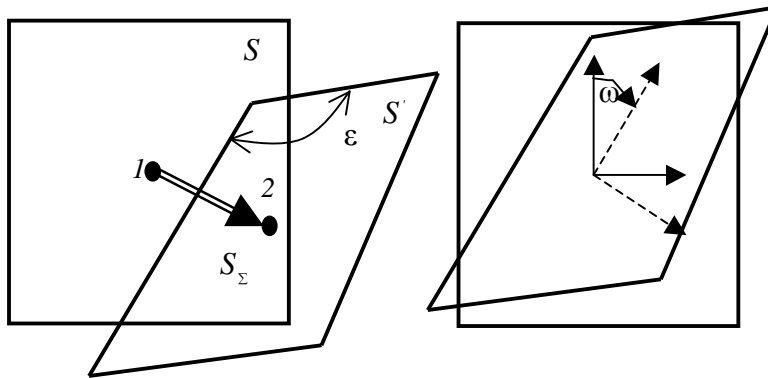


Рис. 2. Відносні зміщення і деформації фрагментів зображень.

Завдяки малим середнім розмірам лазерних спеклів  $d$  відбувається дуже різке зменшення коефіцієнта  $\gamma_s$ , при невеликих зміщеннях фрагментів, що викликає пропорційне зменшення амплітуди піка крос-кореляції і заважає точно визначити великі зміщення поверхні матеріалу в зоні передруйнування. Цю залежність амплітуди піка крос-кореляції лазерних спеклів від величини деформацій використовують безпосередньо для оцінки деформацій у пластичній зоні [2, 8]. Однак похибка таких вимірювань доходить до 10%, якщо невеликий діапазон вимірювання.

З метою розширення діапазону вимірюваних деформацій, підвищення точності вимірювань та спрощення апаратної реалізації і процесу обробки зобра-

жень ми запропонували використовувати як вимірювальний параметр амплітуду крос-кореляційного сигналу, який формується у процесі цифрової обробки некогерентних спекл-зображень.

У випадку некогерентного освітлення поверхні матеріалу буде суттєво зменшено вплив параметра  $\gamma_s$  на амплітуду піка крос-кореляції внаслідок збільшення середніх розмірів плямок у зображеннях. Крім того, зменшуються вплив відхилення висоти мікрорельєфу поверхні і вимоги до однорідності структури поверхні. У випадку некогерентного освітлення можна спеціально готувати досліджувані зразки, розфарбовувати їх поверхню, створюючи штучно випадкову контрастну плямкову структуру із заданими середніми розмірами плямок. Це дасть змогу досліджувати досить грубі з погляду лазерних спеклів поверхні.

Щоб встановити кількісні співвідношення, між величиною деформацій і параметрами кореляційного сигналу запропоновано модель опису кореляційного сигналу для некогерентних спеклів.

Для некогерентного освітлення функція автокореляції матиме в загальному випадку інший вигляд, що зумовлено впливом багатьох чинників, зокрема, станом поверхні і способом формування зображення. Однак якщо кількість некогерентних спеклів (плямок) у цифровому зображенні є достатня, щоб задовольнити центральній граничній теоремі, плямки є симетричні, мають приблизно однаковий діаметр та випадково розподілені на зображенні, то для аналізу крос-кореляційного сигналу фрагментів зображень можна використовувати вираз (1). При цьому форма піка крос-кореляції буде подібна до лазерних спеклів рис. 1, а ширина піка буде приблизно дорівнювати подвійному середньому діаметру плямок.

Для встановлення кореляційної залежності між початковим і зміщеним та деформованим фрагментами некогерентних спекл-зображень припустимо, що середні розміри плямок ставить  $d_x$  і  $d_y$  відповідно вздовж координат  $x'$  і  $y'$  фрагмента, а деформація фрагментів однорідна і відбувається одночасно в двох напрямках  $\varepsilon_x = \frac{\delta x}{x}$  і  $\varepsilon_y = \frac{\delta y}{y}$ , де  $x$  і  $y$  – початкові розміри прямокутного фрагмента, а  $x + \delta x$  і  $y + \delta y$  розміри фрагмента після деформування (рис. 3). Задаючи відносні зміщення фрагментів величинами  $(\Delta x, \Delta y)$ , нормовану функцію крос-кореляції фрагментів можна записати так:

$$C(\Delta x + \delta x, \Delta y + \delta y) = 1 + \gamma, \quad (2)$$

де 
$$\gamma = \frac{1}{x \cdot y} \int_0^x \int_0^y \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta x + x' \varepsilon_x}{d_x}\right) \cdot \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta y + y' \varepsilon_y}{d_y}\right) dx' dy'.$$

Зробивши заміну змінних  $x'$  і  $y'$  у виразі (2) на  $n = x'/d_x$  і  $m = y'/d_y$ , можна записати крос-кореляційну функцію залежно від кількості плямок у фрагменті так:

$$C(n_0 + N \varepsilon_x, m_0 + M \varepsilon_y) = 1 + \gamma, \quad (3)$$

де 
$$\gamma = \frac{1}{N \cdot M} \int_0^N \int_0^M \text{sinc}^2(n_0 + n \varepsilon_x) \cdot \text{sinc}^2(m_0 + m \varepsilon_y) dn dm;$$
  $N = x/d_x$  і  $M = y/d_y$  – середня кількість плямок у фрагменті в заданому напрямку;  $n_0 = \Delta x/d_x$  і  $m_0 = \Delta y/d_y$  – кількість плямок, на яку зміщується фрагмент як ціле.

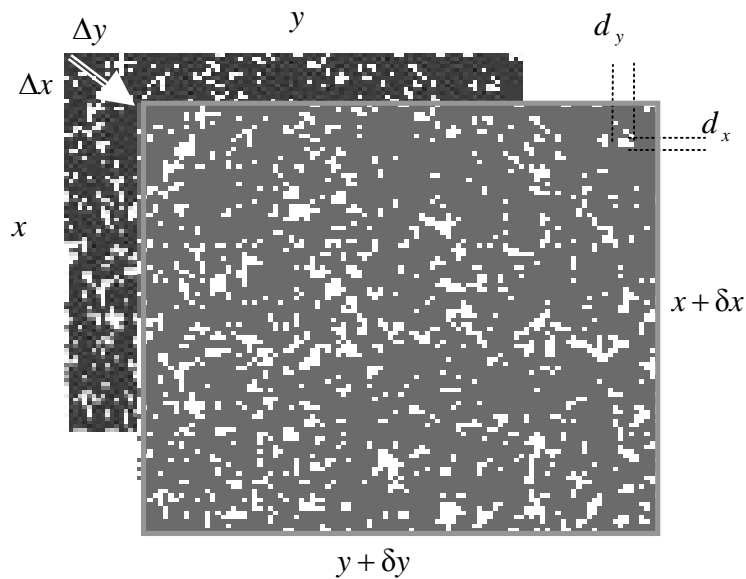


Рис. 3. Відносні зміщення і деформації фрагментів.

Використовуючи вираз (3), були розраховані залежності коефіцієнта кореляції від величини деформацій фрагмента  $\varepsilon = \varepsilon_x = \varepsilon_y$ , середніх розмірів плямок і кількості плямок у фрагменті. Під час розрахунків зміщення фрагментів і розміри плямок задавали у пікселях. Розраховані залежності зображені на рис. 4 і 5.

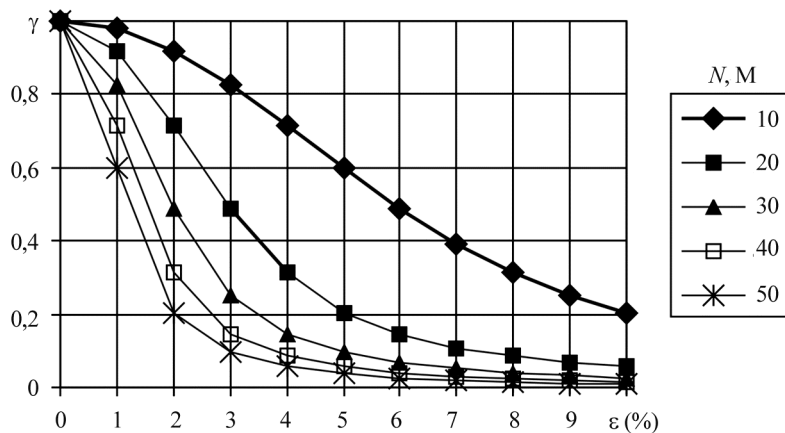


Рис. 4. Залежність коефіцієнта кореляції від величини деформацій, при відносному зміщенні фрагментів  $\Delta x = \Delta y = 0$  і розмірі плямок  $d_x = d_y = 3$ .

Проведені розрахунки виявили значний вплив на амплітуду піка крос-кореляції початкового відносного зміщення фрагментів. Унаслідок зміщення на 0,5 пікселя, за відсутності деформацій, нормований коефіцієнт кореляції становить 0,75 рис. 5. Різке зменшення амплітуди піка зумовлює значні похибки під час визначення положення максимуму піка. Тому під час кореляційної обробки спекл-зображень менші похибки будуть мати алгоритми, які використовують процедури пошуку подібних фрагментів на основі критерію максимізації коефіцієнта кореляції. При цьому буде забезпечено максимально можливий точний збіг фрагментів, які порівнюються, і амплітуда піка крос-кореляції буде максимальна.

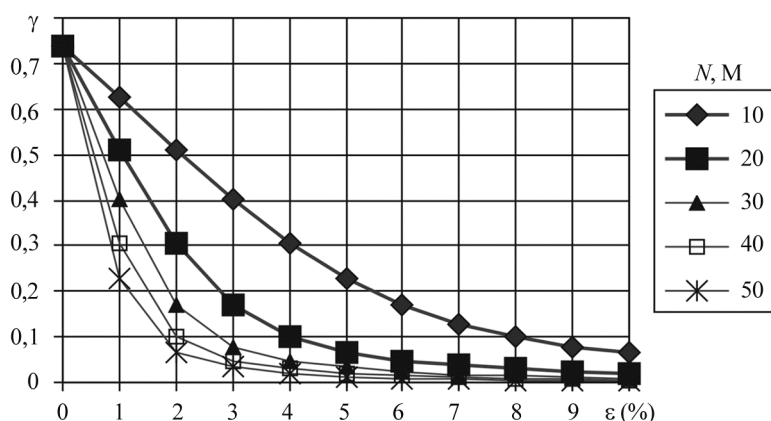


Рис. 5. Залежність коефіцієнта кореляції від величини деформацій при відносному зміщенні фрагментів  $\Delta x = \Delta y = 0,5$  і розмірі плямок  $d_x = 2$ , і  $d_y = 3$ .

Запропоновано модель опису кореляційного сигналу для некогерентних спеклів і встановлено кількісні співвідношення між величиною деформацій та амплітудою піка крос-кореляції з врахуванням розмірів некогерентних спеклів та їх кількості у фрагменті зображення. Отримані результати дають змогу встановити оптимальну кількість плямок у фрагменті шляхом зміни розмірів плямок або розмірів фрагментів на основі даних про діапазон вимірюваних деформацій.

1. Панасюк В. В., Іваницький Я. Л., Максименко О. П. Аналіз пружно-пластичного деформування матеріалу зони перед руйнування // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – № 5. – С. 67–72.
2. Dai Y. Z., Tay C. J., Chiang F. P. Integrated autocorrelation method for plastic strain determination // Strain. – 1990. – 26, № 4. – P. 145–147.
3. Digital speckle-displacement measurement using a complex spectrum method / D. J. Chen, F. P. Chiang, Y. S. Tan, H. S. Don // Applied optics. – 1993. – 32, № 11. – P. 1839–1849.
4. Goodman J. W. Laser Speckle and Related Phenomena / Ed. J. Dainty. – Berlin: Springer-Verlag, 1975. – 283 p.
5. The stress intensity of mixed mode cracks determined by digital image correlation / P. Lopez-Crespo, A. Shterenlikht, E. A. Patterson, J. R. Yates, and P. J. Withers // J. Strain Analysis. – 2008. – 43. – P. 769–780.
6. A combine modeling-experimental study of crack opening displacement fracture criterion for characterization of stable crack growth under mixing mode I/II loading in thin sheet materials / M. A. Satton, M. L. Bone, Ma Fashang, J. D. Helm // Engineering Fracture Mechanics. – 2000. – 66. – P. 171–183.
7. Sjodahl M. Some Recent Advances in Electronic Speckle Photography // Optics and Lasers in Engineering. – 1998. – 29. – P. 125–144.
8. Tay C. J., Shang H. M., Xu C. L. Plastic strain determination using peak speckle pattern intensity // Strain. – 1994. – 30, № 1. – P. 19–23.