

УДК 620.174.22

ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛЯ ЛОКАЛЬНИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЇ СПЕКЛ-КОРЕЛЯЦІЇ З АДАПТИВНОЮ СЕГМЕНТАЦІЄЮ ЗОБРАЖЕНЬ

О. М. САХАРУК, Л. І. МУРАВСЬКИЙ, І. С. ГОЛИНСЬКИЙ, О. В. ЛИЧАК

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Запропоновано метод цифрової спекл-кореляції, що ґрунтується на адаптивній сегментації зображень шорстких поверхонь на фрагменти довільної форми з урахуванням структури та розмірів усіх спеклів, присутніх на цих зображеннях. Метод використано для визначення полів переміщень поверхні дюралюмінієвої балки з бічною втомною тріщиною за триточкового навантаження.

Ключові слова: *адаптивна сегментація зображень, цифрова кореляція, обробка зображень, фільтр дробового степеня.*

Методи спекл-метрології сьогодні стали потужним знаряддям для дослідження напружено-деформованого стану конструкційних матеріалів. Їх інтенсивний розвиток пов'язаний зі створенням нової елементної бази відеотехніки, зокрема матричних відеосенсорів, та поєднанням оптоелектронних методів формування і відбору зображень з новими алгоритмами обробки, відтворення та інтерпретації просторових даних.

Ці методи базуються на кількісному та якісному аналізах динаміки зміни спекл-структур, що формуються внаслідок багатопроменевої інтерференції розсіяного на оптично шорсткій поверхні світла. Переміщення спекл-структур безпосередньо пов'язані з переміщеннями поверхні, причому кожен спекл у сфокусованому спекл-зображенні можна розглядати як зображення прикріпленої до певної точки поверхні оптичної мітки, що пересувається у тривимірному просторі синхронно з цією точкою. Переміщення поверхні зразків вимірюють, порівнюючи два зображення з різними рівнями навантаження. Здебільш методи спекл-кореляції незалежно від алгоритму визначення вектора переміщення використовують процедуру розбиття спекл-зображення на фрагменти квадратної форми, що зумовлює формування матриці векторів переміщень. Такі підходи не враховують криволінійності меж концентраторів напружень та країв зразка, що практично унеможлиблює аналіз полів переміщень поблизу країв концентраторів і вершин тріщин. Зменшення ж розмірів квадратних фрагментів до 5×5 , 4×4 пікселів і менше призводить до значного зростання похибок визначення векторів переміщень у межах таких фрагментів.

В останні роки опубліковано низку праць, присвячених цифровій спекл-кореляції (ЦСК) з використанням адаптивної сегментації зображень [1–6]. Тонг запропонував адаптивну зворотну спекл-кореляцію для визначення полів деформацій у зразках з концентраторами напружень і тріщинами з розбиттям зображень на фрагменти різних форм та розмірів. У результаті йому вдалось поліпшити точність вимірювання деформацій зразка, особливо поблизу берегів тріщини. Основний недолік цього методу – відсутність автоматичного визначення країв зразка. Кофару та ін. запропонували адаптивну сегментацію зображень поверхні зразка з

Контактна особа: e-mail: sakharuk@ipm.lviv.ua

урахуванням структури та розмірів спеклів. Порівнювали фрагменти, застосовуючи метод Лукаса–Канаде для обчислення оптичного потоку та метод Ньютона–Рафсона. Так вдалося підвищити точність вимірювання переміщень, порівняно з традиційними методами ЦСК. Однак тут висувують достатньо жорсткі вимоги до однорідності світлового потоку. Крім того, слід додатково сформувати штучні спекли на поверхні зразка, використовуючи спеціальну методику її фарбування.

Нижче запропоновано метод ЦСК з адаптивною сегментацією зображень поверхні зразка та з урахуванням структури та розмірів спеклів. Для підвищення точності визначення переміщень вжито кореляційний алгоритм з використанням фільтра дробового степеня [7]. Тоді зникає потреба у фарбуванні поверхні зразка. Крім того, відсутні строгі вимоги до однорідності освітлення поверхні, що значно спрощує оптичну схему формування спекл-зображення.

Теоретичне обґрунтування методу. У спекл-зображеннях з високим розділенням великі спекли діаметрами $\langle d \rangle$, що перевищують певне значення d_{\min} , володіють достатньою інформацією для точного визначення переміщень. Алгоритм адаптивної сегментації зображення на фрагменти [4] використовує цей факт і сегментує зображення так, щоб у кожному фрагменті був щонайменше один такий спекл.

Спочатку необхідно знайти відповідні центральні частини спеклів, де $\langle d \rangle > d_{\min}$, чого досягають, відокремлюючи спекли від фону в зареєстрованому спекл-зображенні. Для цього пропонують бінаризувати зображення за методом Оцу [8], який використовують для порогової бінаризації напівтонових зображень з об'єктними та фоновими класами пікселів. Оптимальний поріг, що розділяє ці класи, повинен бути таким, щоб їх внутрішньокласова дисперсія була мінімальною. За допомогою цього методу шукають поріг t , який зменшує дисперсію всередині класу. Цю дисперсію визначають як суму дисперсій двох класів [8]:

$$\sigma_{\omega}^2(t) = \omega_1(t)\sigma_1^2(t) + \omega_2(t)\sigma_2^2(t), \quad (1)$$

де ω_i – апостеріорна імовірність двох класів ($i = 1, 2$), поділених порогом t ; σ_i^2 – дисперсія цих класів. Мінімізація дисперсії всередині класу ідентична її максимізації між класами, тобто

$$\sigma_b^2(t) = \omega_1(t)\omega_2(t)[\mu_1(t) - \mu_2(t)]^2, \quad (2)$$

де μ_i – середнє арифметичне класу. Таким чином, обчисливши величину $\sigma_b^2(t)$ для всіх значень порога t , шукаємо поріг, за якого вона максимальна. Далі нелінійно бінаризуємо зображення, надаючи пікселам з інтенсивністю, більшою за поріг, значення 1, а решті – 0.

Для виділення спеклів, які задовольняють умову $\langle d \rangle > d_{\min}$ (причому мінімальний розмір спекла повинен задовольняти умову $d_{\min} \geq 2$ піксели), виконуємо морфологічну ерозію [9] отриманого бінаризованого зображення, яка є однією з двох базових операцій морфологічної обробки зображень. Основна її ідея – порівняти бінарне зображення A з бінарним структурним елементом B для кожного піксела та його оточення a_i на цьому зображенні. За повної збіжності структурного елемента B з оточенням a_i центральний піксел останнього зберігає своє значення, а в протилежному випадку – набуває значення 0. Таким чином, ерозією з бінаризованого зображення усуваємо всі спекли, що не задовольняють умову $d_{\min} \geq 2$ піксели, а також морфологічно стоншуємо його, щоб знайти центральні частини спеклів [9]. Для цього ітераційно занулюємо піксели всередині спеклів, що призводить до зменшення розмірів спекла до одного піксела. У результаті на спекл-зображенні залишаються лише центри спеклів. Далі маркуємо зв'язані компоненти [10] і отримуємо окремий номер для кожного центра спекла на зображенні.

На завершальному етапі адаптивної сегментації зображення будуємо діаграму Вороного [11], тобто розбиваємо зображення на фрагменти так, щоб кожен фрагмент складався з множини точок, які ближчі до даного центра спеклів, ніж до будь-якого іншого. Після адаптивної сегментації кожному пікселю зображення відповідатиме номер фрагмента, до якого він належить.

Далі порівнюємо кожну відповідну пару фрагментів з двох зображень до та після деформації та визначаємо крос-кореляцію між ними. Одночасно просторово фільтруємо фрагменти фільтром дробового степеня, звужуючи кореляційний пік, що формується в результаті взаємної кореляції двох відповідних фрагментів, підвищуючи так відношення пік/шум. За положенням цього кореляційного піка у кожному фрагменті визначаємо вектор його переміщення. Якщо на вхід цифрового спекл-корелятора вводять два спекл-зображення, що описуються просторовими розподілами інтенсивності $r(x, y)$ та $s(x, y)$, то результат крос-кореляції двох фрагментів $r_1(x, y)$ та $s_1(x, y)$ та їх одночасної просторової фільтрації за допомогою фільтра дробового степеня [12] можна подати виразом

$$c'(k, l) = F_d^{-1} \left\{ \frac{R_1(p, q) S_2^*(p, q)}{|R_1(p, q) S_2^*(p, q)|^{1-\alpha}} \right\}, \quad (3)$$

де $R_1(p, q) = F_d \{r_1(i, j)\}$; $S_1(p, q) = F_d \{s_1(i, j)\}$; F_d і F_d^{-1} – оператори прямого і зворотного дискретного двовимірного перетворення Фур'є; $p = 1, \dots, P$; $q = 1, \dots, Q$ – дискретні відліки функцій $R_{m,n}$ і $S_{m,n}$ у Фур'є-області; α – параметр фільтра дробового степеня, що набуває лише дійсні значення. Субпіксельне положення кореляційного піка визначали, використовуючи алгоритм Сьодала–Бенкерта [13].

Програмна реалізація та апробація методу цифрової спекл-кореляції з адаптивною сегментацією зображень. Для технічної реалізації запропонованого методу використали типову схему цифрового спекл-корелятора (рис. 1).

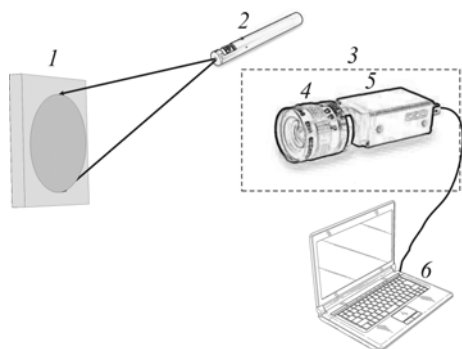


Рис. 1. Експериментальний макет корелятора: 1 – зразок; 2 – джерело світла; 3 – реєструвальна система; 4 – об'єктив; 5 – ПЗЗ-камера; 6 – комп'ютер.

Fig. 1. Correlator experimental setup: 1 – specimen; 2 – source of light; 3 – recording system; 4 – lens; 5 – CCD-camera; 6 – computer.

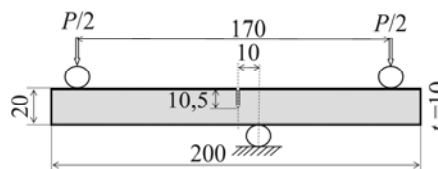
Спекл-зображення об'єкта дослідження реєстрували відеокамерою і вводили в комп'ютер. Серед сукупності зареєстрованих спекл-зображень вибирали два: 1 – за відсутності або на певній стадії початкового навантаження та 2 – після прикладання навантаження до зразка. Для кожної з вибраних пар адаптивно сегментували зображення та ділили на фрагменти згідно з розглянутим вище алгоритмом. Далі здійснювали крос-кореляцію усіх відповідних пар фрагментів і будували за отриманим полем кореляційних піків поля векторів 2D переміщень кожного фрагмента спекл-зображення деформованої поверхні зразка.

Для апробації методу використали зразок з термічно зміцненого сплаву Д16Т, виготовлений згідно з ГОСТ 25.506-85 (тип 4, 10/20, L–T прокат) довжиною 200 mm (рис. 2). Концентратор напружень – фрезерований пропил довжи-

ною 9 mm і шириною 1 mm з втмною тріщиною завдовжки 1,5 mm, пророщеною багаточисловим навантаженням. Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{IC} цього матеріалу $37 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ [14], що відповідає зусиллю старту тріщини, рівному 1685 N. Для забезпечення ефективного розсіювання світла поверхню бокові грані зразка піддавали піскоструминній обробці. Приклали статичне навантаження за схемою триточкового згину.

Рис. 2. Геометричні розміри зразка (в mm) та схема його навантаження.

Рис. 2. Specimen dimensions (in mm) and its loading scheme.



Механічне зусилля вимірювали силоміром типу VISHAY MODEL NO.614, в якому приведена похибка вимірювання сили менша за 0,1%. Давач під'єднували до послідовного порту персонального комп'ютера через індикаторний інтерфейс типу ХК3118Т1. Оптична частина спекл-кореляційної вимірювальної системи виконана на базі цифрової камери SONY XCD 910, розмірність матричного відеосенсора в якій 1392×1040 піксели, а розмір пікселя $4,65 \times 4,65 \mu\text{m}$, масштаб зображення 1 піксел = $20 \mu\text{m}$. Камера з'єднана з комп'ютером через інтерфейс IEEE 1394-1955. Для освітлення зразка використовували світлодіод типу ProLight PG1A-1LRS (потужність світла 1 W, довжина хвилі випромінювання 625 nm).

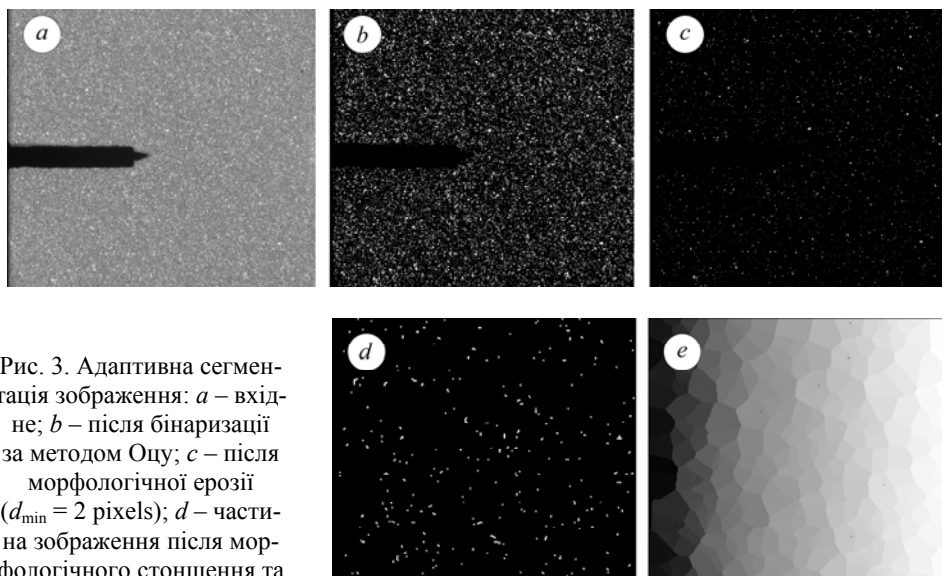


Рис. 3. Адаптивна сегментація зображення: *a* – вхідне; *b* – після бінаризації за методом Оцу; *c* – після морфологічної ерозії ($d_{\min} = 2$ pixels); *d* – частина зображення після морфологічного стоншення та маркування зв'язаних компонентів (центрів спеклів); *e* – його частина після побудови діаграми Вороного.

Fig. 3. Image adaptive segmentation process: *a* – initial; *b* – after binarization with Otsu method; *c* – after morphological erosion ($d_{\min} = 2$ pixels); *d* – part of the image after morphological thinning and labeling of connected components (speckle centers); *e* – part of the image after Voronoi diagrams processing.

Схема випробувань така. Зразок, який фіксували між опорними роликками навантажувальної установки, зазнавав механічних навантажень від 0 до 1000 N з кроком 50 N. На кожному кроці реєстрували зображення поверхні зразка, яке об-

робляли у комп'ютері за допомогою програми, що реалізує адаптивну сегментацію зображень та їх кореляцію (рис. 3).

Результати кореляційної обробки фрагментів зображення наведені на рис. 4. Порівнянням результатів вимірювання переміщень методом ЦСК з адаптивною сегментацією зображень та традиційним з оптимізованим фільтром дробового степеня виявили подібність переміщень поверхні зразка, за винятком зони концентратора напружень. Це зумовлено тим, що метод не враховує криволінійність меж концентратора та країв зразка, а отже, унеможливує аналіз полів переміщень безпосередньо біля країв концентратора. Запропонований метод, на відміну від традиційних, дає змогу точніше будувати поля переміщень, оскільки враховує структуру спекл-зображень під час їх розбиття на фрагменти. Крім того, проти відомих методів спекл-кореляції з адаптивною сегментацією тут усувається чутливість до просторових змін світлового потоку і зникає потреба наносити на поверхню зразків штучні спекли.

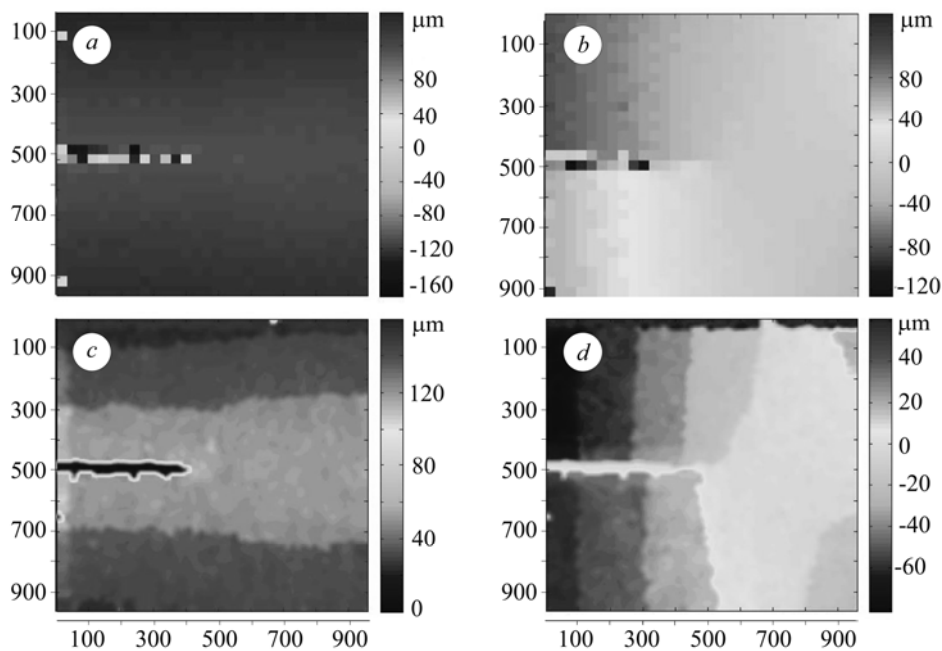


Рис. 4. Результати кореляційної обробки фрагментів зображення традиційним методом цифрової спекл-кореляції з оптимізованим фільтром дробового степеня (*a, b*) та з адаптивною сегментацією зображень (*c, d*) для навантаження 1000 N:

a, c – переміщення вздовж осі *X*; *b, d* – вздовж осі *Y*.

На осях абсцис та ординат значення подано у пікселях.

Fig. 4. Results of subimages correlation processing by conventional digital image correlation technique with optimized fraction power filter (*a, b*) and with image adaptive segmentation (*c, d*) for 1000 N loading: *a, c* – displacements along *X* axis; *b, d* – displacements along *Y* axis. Abscissa and ordinate are given in pixels.

ВИСНОВКИ

Розроблено метод цифрової спекл-кореляції, який полягає в адаптивній сегментації вхідних зображень на фрагменти з їх подальшою кореляційною обробкою з використанням фільтра дробового степеня. Він дає можливість точніше будувати поля переміщень, оскільки враховує структуру спекл-зображень під час їх розбиття на фрагменти, не чутливий до просторових змін світлового потоку проти відомих методів, що базуються на градієнті інтенсивності зображення, а також не потребує нанесення на поверхню зразків штучних спеклів.

РЕЗЮМЕ. Предложен метод цифровой спекл-корреляции, основывающийся на адаптивной сегментации изображений шероховатых поверхностей на фрагменты произвольной формы с учетом структуры и размеров всех спеклов, которые присутствуют на этих изображениях. Метод использован для определения полей перемещений поверхности дюралюминиевой балки с боковой усталостной трещиной при трехточечном нагружении.

SUMMARY. Digital speckle correlation technique on the basis of adaptive segmentation of rough surface images into arbitrary shape subimages taking into account the structure and dimensions of all speckles available in these images with their further correlation processing is proposed. The technique is used for determination of the surface displacement field on of the duralumin beam with an edge fatigue crack under three-point loading.

1. *Mode I Fracture at Spot Welds in Dual-Phase Steel: An Application of Reverse Digital Image Correlation* / H. Tao, P. D. Zavattieri, L. G. Hector et al. // *Exp. Mech.* – 2010. – **50**. – P. 1199–1212.
2. *Tong W.* An adaptive backward image correlation technique for deformation mapping of a growing crack in thin sheets // *Exp. Techniques.* – 2004. – **28**, № 3. – P. 63–67.
3. *Deformation and fracture of miniature tensile bars with resistance spot-weld microstructures* / W. Tong, H. Tao, X. Jianget et al. // *Metall. Mater. Trans. A.* – 2005. – **36 A**. – P. 2651–2669.
4. *Cofaru C., Philips W., and Paeppegem W. V.* Adaptive partitioning method in high resolution speckle imagery for sub-pixel digital image correlation // *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Image Processing ICIP'10.* – Hong Kong (China), 2010. – P. 769–772.
5. *Cofaru C., Philips W., and Paeppegem W. V.* Dense and accurate motion and strain estimation in high resolution speckle images using an image-adaptive approach // *SPIE Proc. Appl. of Digital Image Proc.* – San Diego, California, USA, 2011. – **8135**. – P. 81351G.
6. *Cofaru C., Philips W., and Paeppegem W. V.* A novel speckle pattern – adaptive Digital Image Correlation approach with robust strain calculation // *Optics and Lasers in Engng.* – 2012. – **50**, № 2. – P. 187–198.
7. *Голинський І. С., Муравський Л. І., Половинко Т. І.* Оптимізація методу визначення параметра фільтра дробового степеня у кореляційній функції для аналізу спекл-зображень // *Теорет. електротехніка.* – 2009. – **60**. – С. 118–123.
8. *Otsu N.* A threshold selection method from grey-level histograms // *IEEE Trans. Syst., Man., Cybern.* – 1979. – **9**. – P. 62–66.
9. *Gonzalez R. C. and Woods R. E.* *Digital image processing.* – New Jersey: Prentice Hall, 2002. – 793 p.
10. *Shapiro L. and Stockman G.* *Computer Vision.* – New Jersey: Prentice Hall, 2002. – 580 p.
11. *Пренарата Ф., Шеймос М.* *Вычислительная геометрия: Введение.* – М.: Мир, 1989. – 295 с.
12. *Vijaya Kumar B. V. K., and Hassebrook L.* Performance measures for correlation filters // *Appl. Opt.* – 1990. – **29**, № 20. – P. 2997–3006.
13. *Sjödahl M. and Benckert L. R.* Electronic speckle photography: analysis of an algorithm giving the displacement with subpixel accuracy // *Ibid.* – 1993. – **32**, № 13. – P. 2278–2284.
14. <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA2024T4>

Одержано 05.02.2013