

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ І ЗОБРАЖЕНЬ

УДК 681.7:541.532; 535.31

ЕЛЕКТРОННА СПЕКЛ-ІНТЕРФЕРОМЕТРІЯ ТА СПЕКЛ-КОРЕЛЯЦІЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПРОСТОРОВИХ ПОЛІВ МІКРОПЕРЕМІЩЕНЬ ПОВЕРХОНЬ

Т. Вороняк, А. Кметь, О. Максименко, Л. Муравський

*Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України,
Наукова, 5, 79601, Львів, Україна.
voroniak@ipm.lviv.ua*

Запропоновано схеми експериментальних установок для дослідження просторових полів мікропереміщень шорстких поверхонь. Одна зі схем працює за методом електронної фазозсувної спекл-інтерферометрії. В іншій реалізовано одночасно фазозсувну спекл-інтерферометрію та цифрову кореляцію спекл-зображень, що дає змогу будувати тривимірні поля переміщень поверхні. Обидві схеми апробовані під час досліджень просторових полів переміщень поверхні сталеві балки за навантаження згином. Описано процедуру просторового узгодження полів переміщень, експериментально отриманих різними методами.

Ключові слова: електронна спекл-інтерферометрія; кореляція спекл-зображень; поля мікропереміщень поверхні.

Електронна спекл-інтерферометрія (ЕСІ) є однією з ефективних технологій прецизійного визначення полів переміщень і деформацій оптично шорстких поверхонь. Вона поєднує засоби класичної інтерферометрії і сучасні цифрові технології реєстрації та опрацювання спекл-інтерферограм, які формуються внаслідок інтерференції опорного променя з променем, що відбивається від об'єкта дослідження [1–4]. Крім того, ЕСІ дає змогу визначати як переміщення вздовж напрямку спостереження (нормальні до шорскої поверхні), так і переміщення впоперек напрямку спостереження (тангенціальні). Однак за високої чутливості ЕСІ має обмежений діапазон вимірювання переміщень поверхні. Під час експериментального визначення деформацій зразків часто виникають локальні зсуви поверхні, що значно перевищують допустимі для методів ЕСІ. Такі зсуви неможливо контролювати за допомогою спекл-інтерферограм. Водночас існує можливість визначення переміщень поверхні методами цифрової кореляції спекл-зображень (ЦКС), що дають змогу вимірювати поля переміщень у значно ширшому діапазоні [5]. Хоча методи ЦКС більш завадостійкі, проте їхнє просторове розділення менше, ніж у ЕСІ, і в разі проведення прецизійних досліджень з визначення, наприклад, розмірів зони передруйнування матеріалу [6], просторова розрізненість полів переміщень,

сформованих за допомогою цифрового спекл-корелятора, є недостатньою. Ще нижчою стає просторова розрізненість поздовжніх полів переміщень, отриманих методами тривимірної ЦСК. Однак, синтезуючи нові оптичні схеми електронних спекл-інтерферометрів, а також поєднуючи обидва згадані вище методи й оптимізуючи їх для розв'язування конкретних задач експериментальної механіки, можна очікувати ліпших результатів з відтворення тримірних полів переміщень поверхні.

Визначення полів мікропереміщень поверхні методом ЕСІ. Для отримання повної картини полів переміщень і деформацій поверхні вздовж та впоперек напрямів спостереження необхідно використовувати схему трикоординатного спекл-інтерферометра [2–4]. У такій схемі можна поєднати, наприклад, інтерферометр Маха–Цендера для вимірювання поздовжніх переміщень та два інтерферометри Ліндерця для вимірювання поперечних переміщень у двох взаємно перпендикулярних напрямках [1]. Кожен з інтерферометрів має також містити фазозсувний елемент, що потрібно у разі застосування фазозсувних алгоритмів для відтворення полів мікропереміщень [6–8]. Саме такий трикоординатний спекл-інтерферометр, схему якого показано на рис. 1, використовували автори для дослідження поверхневих полів переміщень металевих балкових зразків, які навантажували за чотириточковим згином [8]. Металеві балки мали розмір $200 \times 20 \times 10$ мм³ і містили концентратор напружень (V-подібний надріз), в околі якого вибирали ділянку спостереження. Під час досліджень інтерферометри вмикали послідовно, а зразок освітлювали розширеним лазерним променем з плоским фронтом. Завдяки такому фронту забезпечували однорідність чутливості інтерферометра (переміщення поверхні, що відповідає появі однієї смуги на різницевій спекл-інтерферограмі) по ділянці спостереження.

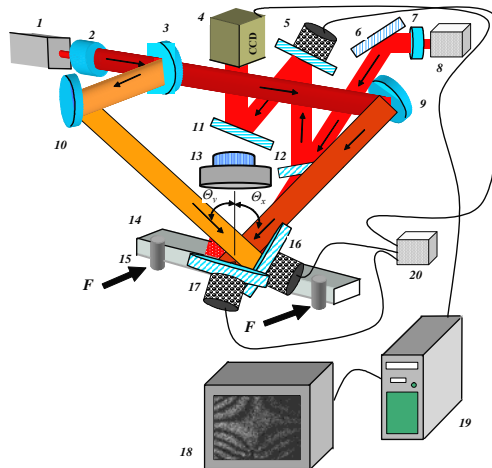


Рис. 1. Схема трикоординатного спекл-інтерферометра: 1, 8 – лазери; 2, 7 – розширювачі лазерного променя; 3, 11, 12 – світло-подільники; 4 – відеокамера; 5, 16, 17 – фазозсувні елементи; 6, 9, 10 – поворотні дзеркала; 13 – об'єктив відеокамери; 14, 15 – зразок з навантажувальною установкою; 18, 19 – монітор з ПК; 20 – блок керування фазозсувними елементами; $F \rightarrow$ – напрям прикладання навантаження.

Як приклад, на рис. 2 зображено різниці спекл-інтерферограми, отримані за допомогою трьох названих вище інтерферометрів. Вони є різницею фазових полів до та після навантаження однієї й тієї ж ділянки зразка розміром $15 \times 11 \text{ мм}^2$. Розмірність зареєстрованих спекл-інтерферограм такої ділянки становила 800×600 пікселів. Чутливість двох інтерферометрів Ліндерця для вимірювання переміщень поверхні впоперек (вісь x) і вздовж балки (вісь y) визначали за виразом [1]

$$\Delta I_{x,y}^0 = \frac{\lambda}{2 \sin \theta_{x,y}},$$

а чутливість інтерферометра Маха-Цендера для вимірювання переміщень уздовж нормалі (вісь z) – за виразом

$$\Delta I_z^0 = \frac{\lambda}{1 + \cos \theta_z},$$

де λ – довжина хвилі лазерного випромінювання; $\theta_{x,y}, \theta_z$ – кути, під якими освітлюють поверхню (див. рис.1). Для заданої схеми ці чутливості становили $\Delta I_x^0 = 0,47 \text{ мкм}$, $\Delta I_y^0 = 0,55 \text{ мкм}$ і $\Delta I_z^0 = 0,32 \text{ мкм}$. Очевидно, що тільки лазерний пучок з плоским фронтом забезпечує однакове значення кутів $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ (однакову чутливість) по всій ділянці спостереження.

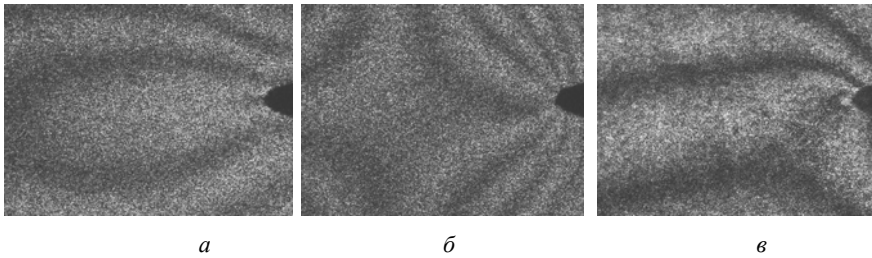


Рис. 2. Різниці спекл-інтерферограми балкового зразка (СТ. 45) з концентратором напружень: *a* – за чутливості інтерферометра впоперек балки; *b* – за чутливості інтерферометра вздовж балки; *v* – за чутливості інтерферометра в напрямі спостереження.

Різниці спекл-інтерферограми дають змогу лише наближено оцінити характер і розмір мікропереміщень поверхні (похибка може бути до половини ширини смуги, що становить у нашому випадку приблизно $0,25 \text{ мкм}$), і не дають змоги визначити напрям переміщень. Для визначення напрямку та досягнення похибки, що не перевищувала 20 нм , формували для кожного положення поверхні зразка без навантаження або після прикладання навантаження дві спекл-інтерферограми, опорний промінь однієї з яких зсунутий на довільний кут α відносно опорного променя іншої. Отримані спекл-інтерферограми опрацьовували за допомогою фазозсувного алгоритму, розробленого авторами і детально описаного в працях [7, 8]. Результати опрацювання за цим алгоритмом показані на рис. 3.

Отже, трикоординатний фазозсувний інтерферометр дає змогу отримати повну картину просторових полів мікропереміщень шорстких поверхонь з високою

просторовою розрізненістю. Однак практичне використання схеми, зображеної на рис. 1, пов'язане з низкою труднощів і потребує спеціального конструкторського забезпечення. Адже три інтерферометри необхідно об'єднати й узгодити з навантажувальною установкою.

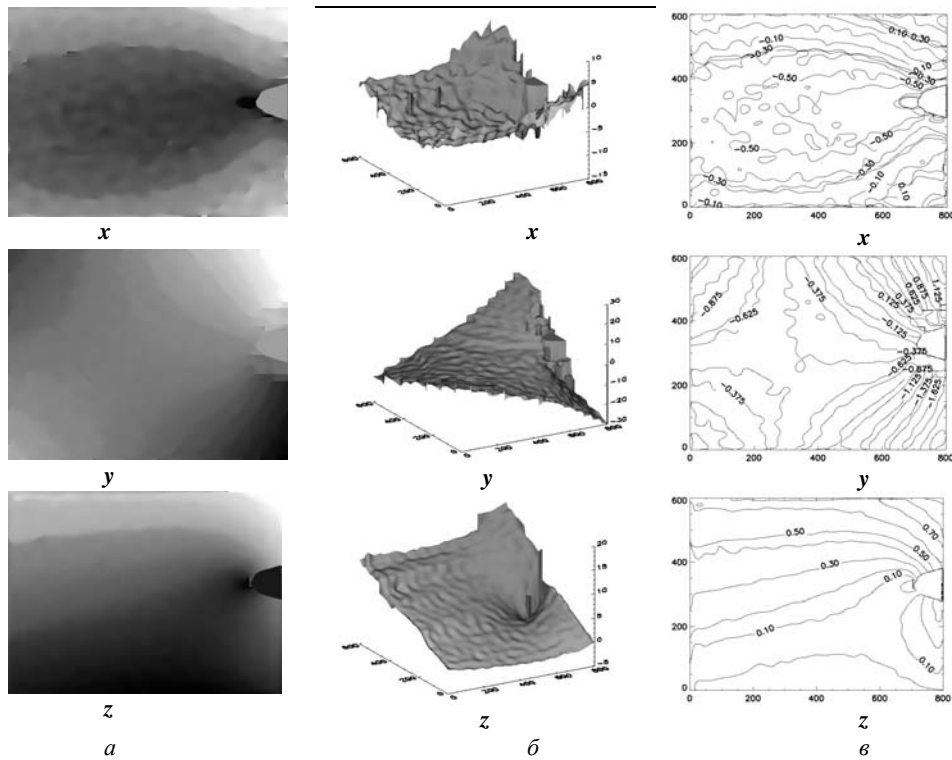


Рис. 3. Результат опрацювання спекл-інтерферограм фазозсувним алгоритмом для балкового зразка (СТ. 45) з концентратором напружень: *a* – фазові поля переміщення поверхні; *б* – ізометричні зображення фазових полів; *в* – карти полів переміщень.

Визначення полів мікропереміщень поверхні методами ЕСІ та ЦКС.

Запропонована авторами схема установки, що дає змогу поєднати методи ЕСІ та ЦКС, є значно простішою порівняно зі схемою трикоординатного спекл-інтерферометра. Ця схема показана на рис. 4. Вона містить лише один інтерферометр Маха-Цендера, доповнений двома закривами. Ці закриви дають змогу перекривати як опорний промінь, так і предметний, або обидва промені одночасно (для реєстрації та подальшої компенсації власних шумів оптичної схеми). Алгоритм визначення *z*-компоненти мікропереміщень для заданої схеми є такими ж, як і для трикоординатного спекл-інтерферометра. Схема дає змогу також реєструвати спекл-зображення поверхні, що допомагає визначати поперечні переміщення поверхні методами ЦКС.

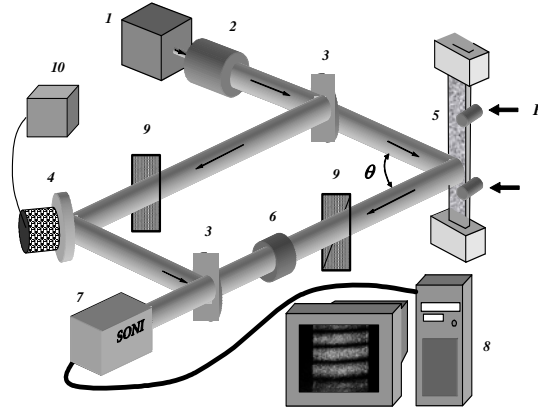


Рис. 4. Схема установки для ЕСІ та ЦКС: 1 – лазер; 2 – розширювач лазерного променя; 3 – світлоподільники; 4 – фазозсувний елемент; 5 – зразок з навантажувальною установкою; 6 – об’єктив відеокамери; 7 – відеокамера; 8 – комп’ютер; 9 – закриви; 10 – блок керування фазозсувним елементом; F – напрям прикладання навантаження.

Для реалізації алгоритму ЦКС опорний промінь в інтерферометрі перекривали закривом 9 і реєстрували два спекл-зображення поверхні зразка в початковому положенні I_1 і в навантаженому стані I_2 . Отримані зображення розбивали на квадратні фрагменти h_{1_1} , h_{1_2} розмірами 16×16 або 32×32 пікселів й обчислювали функції взаємної кореляції пар відповідних фрагментів за виразом

$$\hat{C}(k, l) = \frac{1}{m^2} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{m-1} [h_{1_1}(i, j) \cdot h_{1_2}(i+k, j+l)], \quad (1)$$

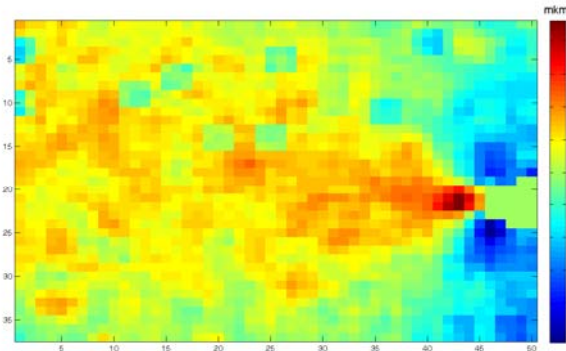
де h_{1_1} – фрагмент зображення I_1 ; h_{1_2} – фрагмент зображення I_2 ; $\hat{C}(k, l)$ – дискретні значення функції кореляції, $k, l = 0, 1, \dots, m-1$.

Оскільки безпосередній розрахунок функції взаємної кореляції за виразом (1) є досить трудомістким, то для прискорення обчислень використовували операції прямого та зворотного швидкого перетворення Фур’є (ШПФ) [5]. У цьому разі функція взаємної кореляції набуває такого вигляду:

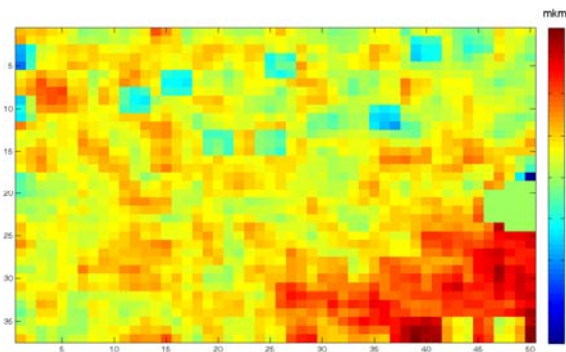
$$\hat{C}(k, l) = F^{-1}(H_{1_1} \times H_{1_2}^*), \quad (2)$$

де $H_{1_1}(r, s) = F(h_{1_1})$ і $H_{1_2}^*(r, s) = F(h_{1_2})^*$ – Фур’є-образи першого і другого фрагментів, F – символ операції ШПФ; F^{-1} – символ операції зворотного ШПФ; $*$ – символ комплексно спряженої функції; $r, s = 0, 1, \dots, m-1$ – дискретні просторові частоти фрагментів зображення.

Поперечні компоненти тривимірного поля переміщень поверхні зразка, отримані в зазначеному вище експерименті за методом ЦКС показані на рис. 5.



a



б

Рис. 5. Поля переміщень отримані методом ЦКС: *a* – поле переміщень за напрямом *x*, мкм; *б* – поле переміщень за напрямом *y*, мкм. Розмірність фрагментів 16×16 пікселів.

Для зручності аналізу деформацій поверхні в площині *xу* будували також карти векторних полів поперечних переміщень поверхні зразка з зазначенням ліній однакових переміщень (ізотет). Карта векторного поля поперечних переміщень поверхні зразка, що зображені на рис. 5, показана на рис. 6.

Оскільки первинний результат експерименту (*z*-компонента тримірному поля переміщень поверхні зразка), отриманий за технологією ЕСІ, має формат 800×600 пікселів, а результат, отриманий за технологією ЦКС, – лише 50×37, то виникає потреба узгодження форматів кінцевого результату.

Для узгодження отримане поле переміщень за напрямом *z* розбивали на такі ж фрагменти, як і вихідні спекл-зображення, і обчислювали середнє значення переміщення для кожного фрагмента $\langle \Delta z \rangle$:

$$\langle \Delta z \rangle = \frac{1}{m^2} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{m-1} \Delta z(i, j),$$

де m – лінійний розмір фрагмента.

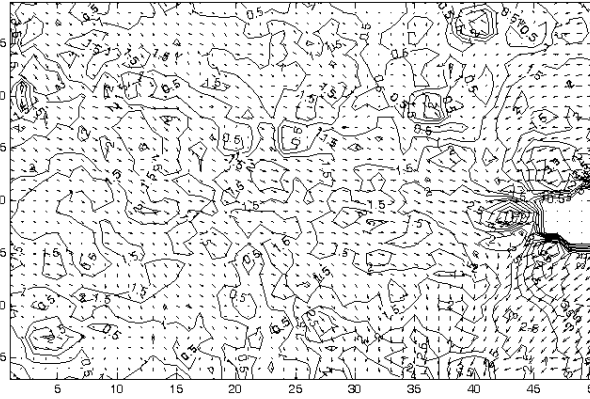


Рис. 6. Карта векторного поля поперечних переміщень поверхні зразка.

Схема запропонованого алгоритму узгодження просторового розділення переміщень, які отримували різними методами (ЕСІ та ЦСК), зображена на рис. 7. У такий спосіб отримано тривимірне поле переміщень кожного фрагмента поверхні зразка в форматі 50×37 пікселів.

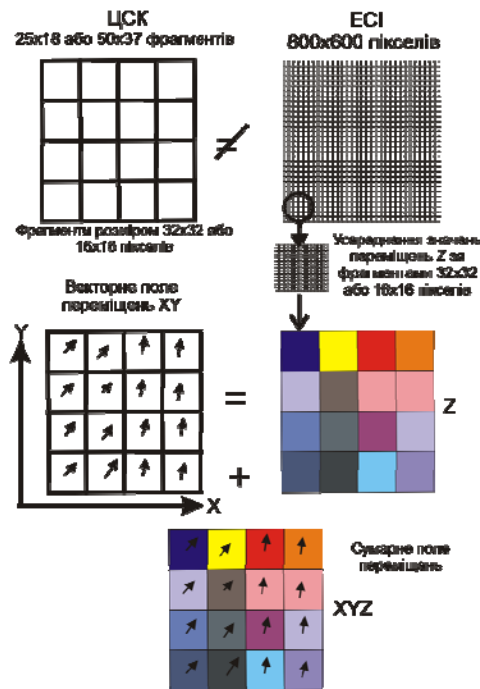


Рис. 7. Схема узгодження x-, y- та z-компонент поля переміщень.

Якщо кожному значенню переміщення поверхні за напрямом z поставити у відповідність певний колір, а в площині xu подати у вигляді карти векторного поля поперечних переміщень, то сумарне поле переміщень досліджуваної поверхні зразка, отримане під час експерименту, можна зобразити у вигляді, як показано на рис. 8.

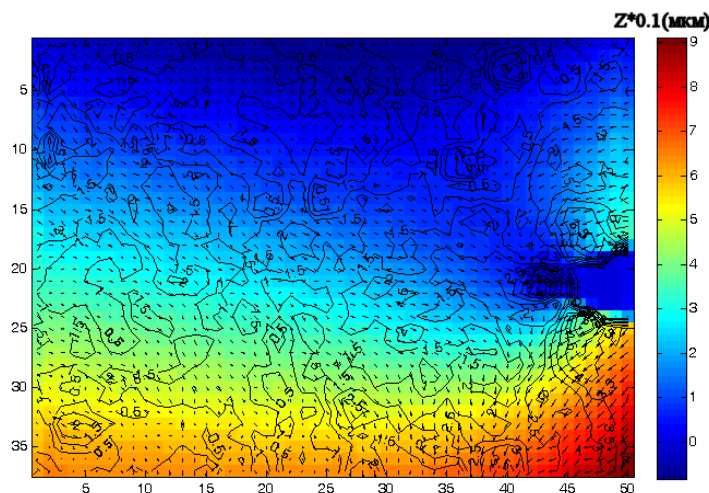


Рис. 8. Тривимірне поле переміщень поверхні зразка.

Отже, метод ЕСІ дає змогу визначати просторові поля мікропереміщень шорстких поверхонь з високою просторовою розрізненістю. Практична його реалізація потребує складної оптичної схеми, що об'єднує три інтерферометри, адже кожен з них чутливий лише в одному напрямі (уздовж однієї координати). Поле переміщень за кожним напрямом є просторовим, тобто відображена в тривимірній системі координат. Одночасне зображення всіх цих полів на одному рисунку є проблематичним. Запропоноване поєднання двох методів ЕСІ та ЦКС для дослідження просторових полів мікропереміщень поверхонь зразків конструкційних матеріалів допомагає значно спростити не лише схему експериментальної установки, а й процедуру відбору, опрацювання та зображення експериментальних даних.

1. *Jones R. and Wykes C.* Holographic and Speckle Interferometry. Cambridge University Press, Cambridge, 1989.
2. *Ettemeyer A.* Combination of 3-D deformation and shape measurement by electronic speckle-pattern interferometry for quantitative strain-stress analysis // Opt. Eng. – 2000. – Vol. 39, N 1. – P. 212–215.

3. *Siebert T., El-Ratal W., Wegner R., Ettemeyer A.* Combine simulation and experiment in automotive testing with ESPI measurement // *Experimental Techniques*. – 2002. – Vol. 26, N 3. – P. 42–47.
4. *Yu Y.J., Wang L.L., Zhang Z.J.* Design of phase-shifting ESPI system for 3D deformation measurement // *J. Physics: Conference Series*. – 2006. – Vol. 48. – P. 911–915.
5. *Муравський Л.І.* Методи спекл-кореляції для дослідження механічних властивостей конструкційних матеріалів. К.: Наук. думка, 2010. – 208 с.
6. *Muravsky L.I., Ostash O.P., Kmet' A.B., Voronyak T.I.* et al. Two-frame phase-shifting interferometry for retrieval of smooth surface and its displacements // *Optics and Lasers in Engineerin.*, 2011. – Vol. 49, N 3. – P. 305–312.
7. *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.
8. *Вороняк Т.І., Кметь А.Б., Муравський Л.І.* Визначення 3d полів переміщень за методом фазозсувної спекл-інтерферометрії // *Фіз.-хім. мех. матеріалів*. – 2009. – Т. 45, № 3. – С. 43–48.

ELECTRONIC SPECKLE PATTERN INTERFEROMETRY AND SPECKLE CORRELATION FOR DETERMINATION OF SURFACE MICRODISPLACEMENT FIELDS

T. Voronyak, A. Kmet', O. Maksymenko, L. Muravsky

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

Schemes of experimental setups for study of microdisplacement fields of rough surfaces are proposed. First scheme realizes the phase-shifting electronic speckle pattern interferometry technique. Second scheme combines simultaneously the phase-shifting electronic speckle pattern interferometry and digital speckle correlation techniques and enables to produce 3D surface displacement fields. Both schemes are tested during analysis of surface displacement fields of a steel beam under bending load. The procedure of spatial matching of displacement fields obtained experimentally by different techniques is considered.

Key words: teletronic speckle pattern interferometry; speckle correlation; surface microdisplacement fields.

**ЭЛЕКТРОННАЯ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ И СПЕКЛ-КОРРЕЛЯЦИЯ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПОЛЕЙ
МИКРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Т. Вороняк, А. Кметь, А. Максименко, Л. Муравский

*Физико-механический институт им. Г.В.Карпенко НАН Украины,
Научная, 5, 79601, Львов, Украина.
voroniak@ipm.lviv.ua*

Предложено схемы экспериментальных установок для исследования пространственных полей микроперемещений шероховатых поверхностей. Одна из схем работает по методу электронной фазосдвигающей спекл-интерферометрии. В другой реализовано одновременно фазосдвигающую спекл-интерферометрию и цифровую корреляцию спекл-изображений, что дает возможность строить трехмерные поля перемещений поверхности. Обе схемы апробированы при исследовании пространственных полей перемещений поверхности стальной балки, которая нагружалась сгибом. Описано процедуру пространственного согласования полей перемещений, которые получены экспериментально разными методами.

Ключевые слова: электронная спекл-интерферометрия; корреляция спекл-изображений; поля микроперемещений поверхности.

Стаття надійшла до редколегії 19.04.2011

Прийнята до друку 26.04.2011