

ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛЯ ПЕРЕМІЩЕНЬ ПОВЕРХНІ ЗА ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ МЕТОДОМ ФАЗОЗСУВНОЇ КОРЕЛЯЦІЙНОЇ СПЕКЛ-ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

Л. І. МУРАВСЬКИЙ

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

Виконано стислий огляд відомих методів цифрової спекл-інтерферометрії, здатних відтворювати поля поверхневих переміщень і деформацій під дією динамічних навантажень. Запропоновано новий неруйнівний метод трикрокової фазозсувної кореляційної спекл-інтерферометрії для дослідження динамічних навантажень конструкційних матеріалів, в якому три спекл-інтерферограми (СІ) поверхні зразка, що відрізняються лише довільними невідомими фазовими зсувами, реєструють до навантаження, а одну – під час навантаження. За отриманими СІ визначають поле переміщень поверхні під дією динамічного навантаження. Наведено два алгоритми реалізації методу, що використовують плавний зсув фази під час запису СІ і дають можливість визначити фазові мапи полів переміщень поверхні у будь-який момент прикладання динамічного навантаження. Виявлено, що цим методом можна формувати часову послідовність полів поверхневих переміщень під час навантаження.

Ключові слова: *поле переміщень поверхні, динамічне навантаження, фазозсувна кореляційна спекл-інтерферометрія, невідомі фазові зсуви, коефіцієнт кореляції Пірсона, неруйнівний метод, методика інтегрованого плавного зсуву фази.*

A brief review of known digital speckle interferometry methods for retrieving the surface displacement and deformation fields under dynamic loads is presented. A new nondestructive method of three-step phase-shifting correlation speckle interferometry to study the dynamic loads of structural materials is proposed. In this method, three speckle interferograms (SIs) of the specimen surface differing only by arbitrary unknown phase shifts are recorded before the load and one SI is recorded under the dynamic load. The surface displacement field under dynamic loading is determined using the obtained SIs. Two algorithms for the implementation of the method are proposed. They use an integrated bucket technique to record SIs and make it possible to determine the phase maps of the surface displacement fields at any moment of applying the dynamic load. It is shown that this method can be used to produce a temporal sequence of surface displacement fields during loading.

Keywords: *surface displacement field, dynamic load, phase-shifting correlation speckle pattern interferometry, unknown phase shifts, Pearson correlation coefficient, nondestructive method, integrating-bucket technique.*

Вступ. На сьогодні цифрова спекл-інтерферометрія (ЦСІ) стала потужним засобом неруйнівного контролю переміщень та деформацій поверхні зразків конструкційних матеріалів [1–5]. Зокрема, розроблено низку неруйнівних методів фазозсувної ЦСІ за дії на матеріал динамічних навантажень або вібрацій. Серед них поширені методи часового усереднення спекл-інтерферограм (СІ) [1, 6–8], стробоскопічні методи [7, 9–11] та ті, що використовують імпульсне когерентне випромінювання [10, 12]. Досить ефективні методи просторової фазозсувної ЦСІ,

оскільки дають змогу одночасно реєструвати декілька СІ, що відрізняються однаковими фазовими зсувами [13].

Перспективним для дослідження динамічних і циклічних навантажень зразків є також алгоритм (5,1), розроблений Као та ін. [14] та апробований у працях [14, 15], який базується на прямій кореляції (ПК) між СІ поверхні [16], які реєструють до і після прикладання навантажень. При цьому ПК між двома СІ виконують, використовуючи коефіцієнт кореляції Пірсона для популяції (ККПП) або коефіцієнт кореляції Пірсона для вибірки (ККПВ) [14–17]. Для реалізації цього алгоритму і побудови фазової мапи переміщень поверхні реєструють до прикладання навантаження п'ять СІ, що відрізняються однаковими каліброваними фазовими зсувами, і лише одну СІ – під час або після навантаження. Тому алгоритм придатний для вивчення динамічних процесів у експериментальній механіці і механіці руйнування. Однак для калібрування фазових зсувів та їх прецизійного виконання необхідне додаткове електронне обладнання у спекл-інтерферометрі. Щоб спростити і пришвидшити реєстрацію СІ, пропонуємо новий неруйнівний метод фазозсувної кореляційної спекл-інтерферометрії (ФКСІ), де спочатку реєструють три СІ поверхні зразка конструкційного матеріалу до навантаження, причому усі три отримують за двох довільних невідомих фазових зсувів між ними. Потім – ще одну СІ під час динамічного навантаження, що дає змогу досліджувати напружено-деформований стан (НДС) матеріалів та елементів конструкцій за цих умов. Зауважимо, що розроблений раніше метод двокрокової фазозсувної ЦСІ, в якому фазовий зсув між двома СІ до і після навантаження невідомий [18], позитивно зарекомендував себе під час дослідження НДС конструкційних матеріалів і визначення коефіцієнта Пуассона [3, 5, 18].

Метод фазозсувної кореляційної спекл-інтерферометрії. У пропонованому методі ФКСІ реєструють до прикладання навантаження до об'єкта досліджень три цифрові СІ $I_{B1}(i)$, $I_{B2}(i)$ та $I_{B3}(i)$, причому $I_{B1}(i)$ і $I_{B2}(i)$ відрізняються невідомим фазовим зсувом α_{21} , а $I_{B2}(i)$ та $I_{B3}(i)$ – зсувом α_{32} , де $i = 1, 2, \dots, N$ – номер пікселя у цифровій СІ. Метод дає можливість використовувати два підходи реєстрації СІ під час динамічного навантаження і обчислення поля переміщень поверхні. Згідно з першим, записують одну СІ $I_{A3}(i)$ під час динамічного навантаження за такого ж фазового зсуву α_{32} , за якого реєстрували СІ $I_{B3}(i)$. Згідно з другим, реєструють одну СІ $I_{A4}(i)$ під час динамічного навантаження за фазового зсуву α_{43} між СІ $I_{B3}(i)$ та СІ $I_{A4}(i)$. Щоб вирівняти контраст у СІ по всьому полю і унезалежити його від локального розподілу інтенсивності освітлення поверхні, пропонують метод ПК [14–16], де обчислюють коефіцієнти кореляції Пірсона для кожної пари записаних СІ і за ними відтворюють згорнуту фазову мапу $\Delta\phi(i)$ поля переміщень.

Розглянемо два алгоритми реалізації цих підходів у методі ФКСІ. При цьому номери i пікселів у розподілах інтенсивності СІ, опорного і предметного хвильових фронтів та полів переміщень поверхні використовуватимемо лише за необхідності. У першому алгоритмі (3≠,1)+ПК СІ I_{A3} реєструють за такого ж фазового зсуву третьої СІ I_{B3} , отриманої до навантаження. Цей алгоритм для початкового стану досліджуваної поверхні можна виконати за допомогою відомої методики інтегрованого плавного зсуву фази [19]. Відразу ж після запису СІ I_{B3} плавний зсув фази припиняється, після чого зразок зазнає циклічного або динамічного навантаження, під час яких СІ I_{A3} реєструють за такого ж фазового зсуву

α_{32} , як і СІ I_{B3} . У другому алгоритмі (3≠,1)+ПК під час плавного зсуву фази реєструють три СІ I_{B1} , I_{B2} та I_{B3} і, продовжуючи плавний фазовий зсув, записують СІ I_{A4} під час динамічного навантаження зразка. Знак “≠” тут вказує на те, що фазові зсуви між трьома СІ у ненавантаженому стані різні, довільні і наперед невідомі. При цьому у ЦСІ припускають, що розподіл різниць випадкового фазового поля $\psi(i) = \psi_O(i) - \psi_R(i)$ між предметним ψ_O і опорним ψ_R променями на виході оптичної системи інтерферометра не змінюється під час мікропереміщень поверхні за динамічних навантажень. Спрощені схеми технічної реалізації цих алгоритмів із використанням методики інтегрованого плавного зсуву фази наведені на рис. 1 і 2.

Рис. 1. Схема реалізації першого алгоритму (3≠,1)+ПК з використанням методики інтегрованого плавного зсуву фази:
a – профіль ділянки вихідної поверхні зразка;
b – реєстрація трьох СІ I_{B1} , I_{B2} та I_{B3} ділянки поверхні за плавного зсуву фази до навантаження;
c, d – профіль ділянки поверхні зразка та реєстрація однієї СІ I_{A3} під час навантаження;
e – профіль розгорнутої фазової мапи $\Delta\varphi_u$ поля переміщень ділянки поверхні.

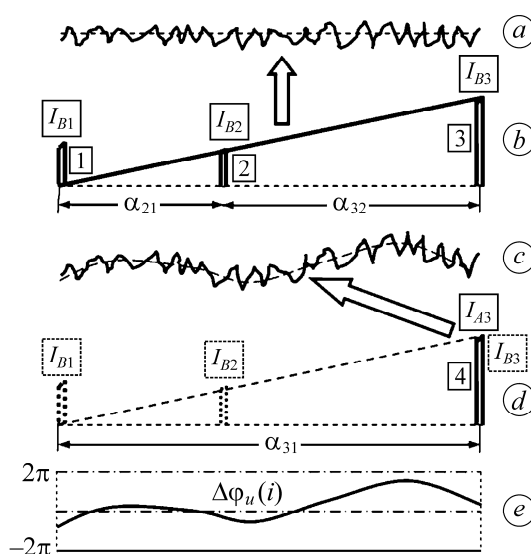


Fig. 1. Scheme of the first algorithm (3≠,1)+direct correlation (DC) implementation using the integrating bucket technique: *a* – profile of the initial surface area of the specimen; *b* – registration of three speckle interferograms (SI) I_{B1} , I_{B2} and I_{B3} of the surface area for a smooth phase shift before loading; *c, d* – profile of the specimen surface area and registration of one SI I_{A3} under dynamic load; *e* – profile of the unwrapped phase map $\Delta\varphi_u$ of the surface area displacement field.

Проаналізуємо ці алгоритми і знайдемо формули для обчислення згорнутої фазової мапи поля переміщень $\Delta\varphi$ поверхні під час навантажень конструкційних матеріалів, які є ключовими, щоб відтворити поля переміщень за відомими алгоритмами розгортання згорнутої фазової мапи [20] і перетворити фазове поле переміщень $\Delta\varphi_u$ у метричне.

Перший алгоритм (3≠,1)+ПК. У ньому використовують три цифрові СІ поверхні зразка I_{B1} , I_{B2} , I_{B3} , одержані до навантаження, і одну I_{A3} – під час прикладання, зареєстровану за того ж фазового зсуву α_{32} , за якого одержано і СІ I_{B3} . Отже, до навантаження реєструють три СІ, які описує система рівнянь

$$\left. \begin{aligned} I_{B1} &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos \psi \\ I_{B2} &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\psi + \alpha_{21}) \\ I_{B3} &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\psi + \alpha_{32}) \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де I_O , I_R – розподіли інтенсивностей предметного і опорного променів до навантаження; α_{21} , α_{32} – довільні фазові зсуви між СІ I_{B1} , I_{B2} ; I_{B2} та I_{B3} , а також між СІ I_{B2} та I_{A3} . Тут номери пікселів у розподілах інтенсивностей $I_{B1}(i)$, $I_{B2}(i)$, $I_{B3}(i)$, $I_{A3}(i)$, $I_O(i)$, $I_R(i)$ та різниць випадкового фазового поля $\psi(i)$ опускаємо.

Після припинення плавного зсуву фази зразок зазнає динамічного навантаження, під час якого у заданий момент часу реєструють СІ деформованої поверхні:

$$I_{A3} = I_{O1} + I_{R1} + 2\sqrt{I_{O1} I_{R1}} \cos(\psi + \alpha_{31} + \Delta\phi), \quad (2)$$

де I_{O1} , I_{R1} – розподіли інтенсивностей предметного і опорного променів під час навантаження; $\alpha_{31} = \alpha_{21} + \alpha_{32}$. Оскільки СІ I_{A3} реєструють через деякий час після припинення фазового зсуву і під час динамічного навантаження, то їх розподіли вже можуть відрізнятися від початкових I_O та I_R , тобто $I_O \neq I_{O1}$, $I_R \neq I_{R1}$.

Невідомі кути фазових зсувів α_{32} і α_{31} можна знайти за кореляційним підходом, обчислюючи ККПП. Його вперше запропонували у праці [21] для заводостійких фазометрів під час визначення фазового зсуву між вхідними сигналами з постійними амплітудами і фазами, вперше використали для інтерферограм у вигляді алгоритму калібрування фази [22] та для СІ у праці [18]. Згідно з кореляційним підходом

$$\alpha_{31} = \arccos \frac{\langle I_{B1} I_{B3} \rangle - \langle I_{B1} \rangle \langle I_{B3} \rangle}{\sqrt{\langle I_{B1}^2 \rangle - \langle I_{B1} \rangle^2} \sqrt{\langle I_{B3}^2 \rangle - \langle I_{B3} \rangle^2}}, \quad (3)$$

$$\alpha_{32} = \arccos \frac{\langle I_{B2} I_{B3} \rangle - \langle I_{B2} \rangle \langle I_{B3} \rangle}{\sqrt{\langle I_{B2}^2 \rangle - \langle I_{B2} \rangle^2} \sqrt{\langle I_{B3}^2 \rangle - \langle I_{B3} \rangle^2}}, \quad (4)$$

де $\langle \rangle$ – середнє за ансамблем. Зауважимо, що кути α_{31} і α_{32} можна також знайти за коефіцієнтом кореляції Пірсона для вибірки [23].

Для визначення фазової мапи $\Delta\phi$ з виразів (1)–(4) поєднаємо трикроковий фазозсувний алгоритм з довільними зсувами фази опорного променя [24, 25] із алгоритмом ПК [14–16]. З цією метою припускаємо, що опорний і предметний промені з розподілами інтенсивностей I_O , I_R та I_{O1} , I_{R1} є випадковими когерентними хвильовими фронтами, які між собою абсолютно нескорельовані. Для таких хвильових фронтів справедливі співвідношення [1, 26]

$$\begin{aligned} \langle I_O I_R \rangle &= \langle I_O \rangle \langle I_R \rangle, \quad \langle I_{O1} I_{R1} \rangle = \langle I_{O1} \rangle \langle I_{R1} \rangle, \quad \langle I_O^2 \rangle = 2\langle I_O \rangle^2, \quad \langle I_{O1}^2 \rangle = 2\langle I_{O1} \rangle^2, \\ \langle I_R^2 \rangle &= 2\langle I_R \rangle^2, \quad \langle I_{R1}^2 \rangle = 2\langle I_{R1} \rangle^2, \quad \langle \cos(\psi) \rangle = \langle \cos(\psi + \beta) \rangle = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

де β – деякий кут.

Враховуючи вирази (1), (2) і (5), а також той факт, що предметні I_O і I_{O1} та опорні I_R і I_{R1} хвильові фронти пов'язані кореляційними залежностями, тобто

частково корелюють між собою, отримуємо такі вирази для ККПП ρ_{13} між СІ I_{B1} та I_{A3} ; ρ_{23} між СІ I_{B2} та I_{A3} , а також ρ_{33} між СІ I_{B3} та I_{A3} :

$$\rho_{13}(\Delta\varphi) = \frac{\langle I_O I_{O1} \rangle - \langle I_O \rangle \langle I_{O1} \rangle + \langle I_R I_{R1} \rangle - \langle I_R \rangle \langle I_{R1} \rangle + 2\sqrt{\langle I_O \rangle \langle I_R \rangle} \sqrt{\langle I_{O1} \rangle \langle I_{R1} \rangle} \cos(\Delta\varphi + \alpha_{31})}{(\langle I_O \rangle + \langle I_R \rangle)(\langle I_{O1} \rangle + \langle I_{R1} \rangle)}, \quad (6)$$

$$\rho_{23}(\Delta\varphi) = \frac{\langle I_O I_{O1} \rangle - \langle I_O \rangle \langle I_{O1} \rangle + \langle I_R I_{R1} \rangle - \langle I_R \rangle \langle I_{R1} \rangle + 2\sqrt{\langle I_O \rangle \langle I_R \rangle} \sqrt{\langle I_{O1} \rangle \langle I_{R1} \rangle} \cos(\Delta\varphi + \alpha_{32})}{(\langle I_O \rangle + \langle I_R \rangle)(\langle I_{O1} \rangle + \langle I_{R1} \rangle)}, \quad (7)$$

$$\rho_{33}(\Delta\varphi) = \frac{\langle I_O I_{O1} \rangle - \langle I_O \rangle \langle I_{O1} \rangle + \langle I_R I_{R1} \rangle - \langle I_R \rangle \langle I_{R1} \rangle + 2\sqrt{\langle I_O \rangle \langle I_R \rangle} \sqrt{\langle I_{O1} \rangle \langle I_{R1} \rangle} \cos(\Delta\varphi)}{(\langle I_O \rangle + \langle I_R \rangle)(\langle I_{O1} \rangle + \langle I_{R1} \rangle)}. \quad (8)$$

Таким чином, зареєструвавши розподіли інтенсивностей I_{B1} , I_{B2} , I_{B3} та I_{A3} у спекл-інтерферометрі, можна обчислити ККПП ρ_{13} , ρ_{23} та ρ_{33} .

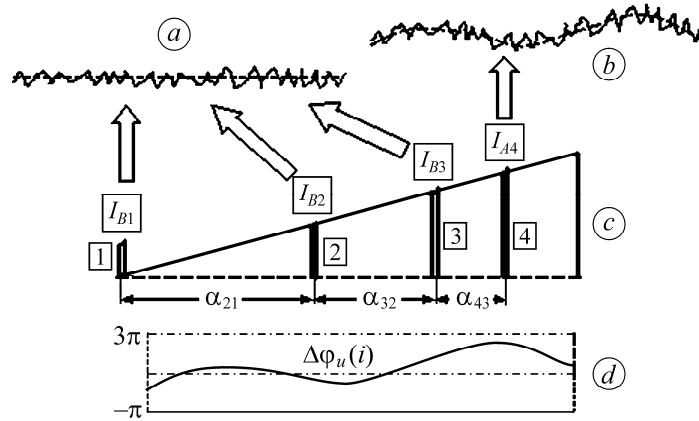


Рис. 2. Схема реалізації другого алгоритму (3≠,1)+ПК з використанням методики інтегрованого плавного зсуву фази: *a*, *b* – профілі ділянки поверхні зразка до та під час динамічного навантаження; *c* – реєстрація трьох СІ I_{B1} , I_{B2} та I_{B3} ділянки поверхні до та СІ I_{A4} під час динамічного навантаження за одного плавного зсуву фази; *d* – профіль розгорнутої фазової мапи $\Delta\varphi_u$ поля переміщень поверхні.

Fig. 2. Scheme of the second algorithm (3≠,1)+DC implementation using the integrated bucket technique: *a*, *b* – profile of the surface area of the specimen before and during dynamic loading; *c* – registration of three speckle interferograms (SI) I_{B1} , I_{B2} and I_{B3} of the surface area before loading and SI I_{A4} under dynamic load with one smooth phase shift; *d* – profile of the unwrapped phase map $\Delta\varphi_u$ of the surface displacement field.

Вирази (6)–(8) містять математичні сподівання добутків $\langle I_O I_{O1} \rangle$ та $\langle I_R I_{R1} \rangle$, які для опису спекл-полів комплексним гауссівським процесом у площині реєстрації можна записати так [26, 27]:

$$\langle I_O I_{O1} \rangle = \langle I_O \rangle \langle I_{O1} \rangle (1 + |\mu_O|^2), \quad \langle I_R I_{R1} \rangle = \langle I_R \rangle \langle I_{R1} \rangle (1 + |\mu_R|^2), \quad (9)$$

де μ_O , μ_R – коефіцієнти кореляції між розподілами комплексних амплітуд двох предметних і двох опорних хвильових фронтів, які визначити складно. Для цього потрібно додатково реєструвати розподіли інтенсивностей предметного I_O та I_{O1} і опорного I_R та I_{R1} хвильових фронтів і здійснювати додаткові трудомісткі обчислення, застосовуючи додаткові програмні продукти. Крім того, часові флуктуації інтенсивності хвильових фронтів та напрямів їх поширення ще більше ускладнюють цю процедуру.

Щоб уникнути цього, можна використати простіші взаємозалежності між розподілами інтенсивностей опорного і предметного хвильових фронтів. З цією метою розглянемо характерний для експериментальних досліджень випадок, коли розподіли інтенсивностей I_{O1} і I_{R1} змінюються пропорційно по всьому полю згідно з відповідними розподілами інтенсивностей I_O та I_R , тобто $I_{O1} = aI_O$, $I_{R1} = aI_R$, або залишаються без змін, тобто $I_{O1} = I_O$, $I_{R1} = I_R$, а співвідношення між математичним сподіваннями інтенсивностей цих хвильових фронтів мають вигляд [1]

$$\langle I_R \rangle = k \langle I_O \rangle, \quad \langle I_{R1} \rangle = k \langle I_{O1} \rangle, \quad (10)$$

де a і k – довільні сталі.

Підставивши вирази (5) і (10) у (6)–(8), маємо:

$$\left. \begin{aligned} \rho_{13}(\Delta\varphi) &= \frac{1+k^2+2k\cos(\Delta\varphi+\alpha_{31})}{(1+k)^2} \\ \rho_{23}(\Delta\varphi) &= \frac{1+k^2+2k\cos(\Delta\varphi+\alpha_{32})}{(1+k)^2} \\ \rho_{33}(\Delta\varphi) &= \frac{1+k^2+2k\cos(\Delta\varphi)}{(1+k)^2} \end{aligned} \right\}. \quad (11)$$

Зі системи рівнянь (11) знаходимо вираз для згорнутої фазової мапи переміщення поверхні у кожному пікселі:

$$\Delta\varphi = \arctan \left\{ \frac{C(\rho_{23} - \rho_{13})}{[C\rho_{33} - D](\sin\alpha_{31} - \sin\alpha_{32})} - \tan \frac{\alpha_{31} + \alpha_{32}}{2} \right\}. \quad (12)$$

де $C = (1+k)^2$, $D = 1+k^2$.

У СІ поверхонь зразків конструкційних матеріалів завжди присутні високо-частотні шуми, викликані випадковими просторовими розподілами інтенсивності у спекл-зображеннях, які формує шорстка поверхня. Вони погіршують достовірність відтворення полів переміщень поверхні. Частково їх можна усунути, якщо усереднювати інтенсивності кожного пікселя СІ. Для цього використаємо методику, запропоновану раніше [16], де для прямої кореляції ККПП між двома СІ замінили на ККПВ, а інтенсивність кожного пікселя у СІ усереднювали в межах підмножини пікселів розмірністю $m \times m$. Тому, обчислюючи ККПВ, замість інтенсивностей i -их пікселів I_{B1i} , I_{B2i} , I_{B3i} та I_{A3i} вжили середні арифметичні значення інтенсивностей підмножини із $m \times m$ пікселів із центром у i -му пікселі, тобто

$$\bar{I}_{B1i} = \frac{1}{m^2} \sum_{j=1}^{m^2} I_{B1ij}, \quad \bar{I}_{B2i} = \frac{1}{m^2} \sum_{j=1}^{m^2} I_{B2ij}, \quad \bar{I}_{B3i} = \frac{1}{m^2} \sum_{j=1}^{m^2} I_{B3ij}, \quad \bar{I}_{A3i} = \frac{1}{m^2} \sum_{j=1}^{m^2} I_{A3ij}, \quad (13)$$

де $i = 1, \dots, N_i$; $j = 1, \dots, m^2$; при цьому вважали, що $N_i \rightarrow N$, і якщо $N \geq 64^2$, то $N_i = N$.

Враховуючи вирази (13), ККПВ r_{13} між \bar{I}_{B1i} та \bar{I}_{A3i} , r_{23} між \bar{I}_{B2i} та \bar{I}_{A3i} і r_{33} між \bar{I}_{B3i} та \bar{I}_{A3i} у кожному i -му пікселі подамо у такому вигляді:

$$r_{13}(\Delta\varphi, i) = \frac{\frac{1}{m^2} \sum_{j=1}^{m^2} (I_{B1ij} I_{A3ij}) - \bar{I}_{B1i} \cdot \bar{I}_{A3i}}{\frac{1}{m^2} \sqrt{\sum_{j=1}^{m^2} [I_{B1ij}^2 - (\bar{I}_{B1i})^2]} \sqrt{\sum_{j=1}^{m^2} [I_{A3ij}^2 - (\bar{I}_{A3i})^2]}}, \quad (14)$$

$$r_{23}(\Delta\varphi, i) = \frac{\frac{1}{m^2} \sum_{j=1}^{m^2} (I_{B2ij} I_{A3ij}) - \bar{I}_{B2i} \cdot \bar{I}_{A3i}}{\frac{1}{m^2} \sqrt{\sum_{j=1}^{m^2} [I_{B2ij}^2 - (\bar{I}_{B2i})^2]} \sqrt{\sum_{j=1}^{m^2} [I_{A3ij}^2 - (\bar{I}_{A3i})^2]}}, \quad (15)$$

$$r_{33}(\Delta\varphi, i) = \frac{\frac{1}{m^2} \sum_{j=1}^{m^2} (I_{B3ij} I_{A3ij}) - \bar{I}_{B3i} \cdot \bar{I}_{A3i}}{\frac{1}{m^2} \sqrt{\sum_{j=1}^{m^2} [I_{B3ij}^2 - (\bar{I}_{B3i})^2]} \sqrt{\sum_{j=1}^{m^2} [I_{A3ij}^2 - (\bar{I}_{A3i})^2]}}. \quad (16)$$

ККПВ розглядають як конзистентну (точкову) оцінку ККПП [17], яка визначає певний довірчий інтервал, що призводить до відхилення обчисленого значення ККПВ від ККПП. Однак, оскільки зі збільшенням кількості пікселів у фрагменті СІ розмірністю $m \times m$ це відхилення зменшується і стає мізерно малим, то можна завжди вибрати таку кількість пікселів, щоб його не враховувати. Тому замінимо у формулі (12) ККПП на ККПВ і, обчисливши α_{31} , α_{32} за формулами (3) і (4), а також ККПВ – за формулами (14)–(16), отримуємо такий кінцевий вираз для розрахунку згорнутої фазової мапи $\Delta\varphi$ поля переміщень:

$$\Delta\varphi = \arctan \left\{ \frac{C(r_{23} - r_{13})}{(Cr_{33} - D)(\sin \alpha_{31} - \sin \alpha_{32})} - \tan \frac{\alpha_{31} + \alpha_{32}}{2} \right\}. \quad (17)$$

Якщо $k = 1$, то

$$\Delta\varphi = \arctan \left[\frac{2(r_{23} - r_{13})}{(2r_{33} - 1)(\sin \alpha_{31} - \sin \alpha_{32})} - \tan \frac{\alpha_{31} + \alpha_{32}}{2} \right]. \quad (18)$$

Отже, згорнуту фазову мапу поля переміщень в інтервалі $(-\pi/2, \pi/2)$ описують вирази (17) і (18). Розширюючи її інтервал вдвічі за допомогою функції atan2 [28] і використовуючи один із багатьох відомих алгоритмів розгортання фазових мап [20], отримуємо фазове поле переміщень поверхні $\Delta\varphi_u$, яке пропорційне метричному Δz . Якщо застосовувати, наприклад, інтерферометр Тваймана–Гріна або інший, де площина реєстрації інтерферограм перпендикулярна до напрямку падіння предметного і опорного променів на об'єкт досліджень, а також до напрямку їх поширення після відбивання від об'єкта, то точки метричного поля переміщень від площини (поздовжніх до напрямку спостереження) Δz та відповідні точки фазового поля переміщень у відтвореній фазовій мапі $\Delta\varphi$ пов'язані

співвідношенням $\Delta z = \lambda(\Delta\phi)/4\pi$, де λ – довжина хвилі випромінювання лазера в інтерферометрі.

Другий алгоритм (3~~ж~~1)+ПК. Він реалізує другий підхід до реєстрації СІ під час динамічного навантаження та обчислення поля переміщень поверхні і використовує три цифрові СІ поверхні зразка I_{B1} , I_{B2} , I_{B3} , зареєстровані до прикладання навантаження, і одну СІ I_{A4} – під час динамічного навантаження, зареєстровану за фазового зсуву α_{43} . Усі чотири СІ фіксують за плавного зсуву фази в інтерферометрі від 0 до 180°. Тому можна вважати, що за один плавний зсув фази розподіли предметного і опорного хвильових фронтів не змінюють своєї просторової структури та інтенсивності. У цьому випадку усі СІ можна описати такою системою рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} I_{B1} &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos \psi \\ I_{B2} &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\psi + \alpha_{21}) \\ I_{B3} &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\psi + \alpha_{32}) \\ I_{A4} &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\psi + \Delta\phi + \alpha_{43}) \end{aligned} \right\}, \quad (19)$$

де

$$\alpha_{43} = \arccos \frac{\langle I_{B3} I_{A4} \rangle - \langle I_{B3} \rangle \langle I_{A4} \rangle}{\sqrt{\langle I_{B3}^2 \rangle - \langle I_{B3} \rangle^2} \sqrt{\langle I_{A4}^2 \rangle - \langle I_{A4} \rangle^2}} \quad (20)$$

довільний фазовий зсув між СІ I_{B3} та I_{A4} .

ККПВ r_{14} між СІ I_{B1} та I_{A4} , r_{24} між I_{B2} та I_{A4} і r_{33} між I_{B3} та I_{A4} у кожному i -му пікселі обчислюємо за формулами, отриманими так само, як і формули (14)–(16), тобто

$$r_{14}(\Delta\phi, i) = \frac{\frac{1}{m^2} \sum_{j=1}^{m^2} (I_{B1ij} I_{A4ij}) - \bar{I}_{B1i} \cdot \bar{I}_{A4i}}{\frac{1}{m^2} \sqrt{\sum_{j=1}^{m^2} [I_{B1ij}^2 - (\bar{I}_{B1i})^2]} \sqrt{\sum_{j=1}^{m^2} [I_{A4ij}^2 - (\bar{I}_{A4i})^2]}}, \quad (21)$$

$$r_{24}(\Delta\phi, i) = \frac{\frac{1}{m^2} \sum_{j=1}^{m^2} (I_{B2ij} I_{A4ij}) - \bar{I}_{B2i} \cdot \bar{I}_{A4i}}{\frac{1}{m^2} \sqrt{\sum_{j=1}^{m^2} [I_{B2ij}^2 - (\bar{I}_{B2i})^2]} \sqrt{\sum_{j=1}^{m^2} [I_{A4ij}^2 - (\bar{I}_{A4i})^2]}}, \quad (22)$$

$$r_{34}(\Delta\phi, i) = \frac{\frac{1}{m^2} \sum_{j=1}^{m^2} (I_{B3ij} I_{A4ij}) - \bar{I}_{B3i} \cdot \bar{I}_{A4i}}{\frac{1}{m^2} \sqrt{\sum_{j=1}^{m^2} [I_{B3ij}^2 - (\bar{I}_{B3i})^2]} \sqrt{\sum_{j=1}^{m^2} [I_{A4ij}^2 - (\bar{I}_{A4i})^2]}}. \quad (23)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (19) для $\Delta\phi$ і враховуючи (21)–(23), дістанемо:

$$\Delta\phi = \arctan \left\{ \frac{(Cr_{14} - D)(\cos \alpha_{42} - \cos \alpha_{43}) - C(r_{24} - r_{34}) \cos \alpha_{41}}{(Cr_{14} - D)(\sin \alpha_{42} - \sin \alpha_{43}) - C(r_{24} - r_{34}) \sin \alpha_{41}} \right\}, \quad (24)$$

де $C = (1+k)^2$, $D = 1+k^2$, $\alpha_{41} = \alpha_{21} + \alpha_{32} + \alpha_{43}$, $\alpha_{42} = \alpha_{32} + \alpha_{43}$, причому

$$\alpha_{41} = \arccos \frac{\langle I_{B1} I_{A4} \rangle - \langle I_{B1} \rangle \langle I_{A4} \rangle}{\sqrt{\langle I_{B1}^2 \rangle - \langle I_{B1} \rangle^2} \sqrt{\langle I_{A4}^2 \rangle - \langle I_{A4} \rangle^2}}, \quad (25)$$

$$\alpha_{42} = \arccos \frac{\langle I_{B2} I_{A4} \rangle - \langle I_{B2} \rangle \langle I_{A4} \rangle}{\sqrt{\langle I_{B2}^2 \rangle - \langle I_{B2} \rangle^2} \sqrt{\langle I_{A4}^2 \rangle - \langle I_{A4} \rangle^2}}, \quad (26)$$

$$\alpha_{43} = \arccos \frac{\langle I_{B3} I_{A4} \rangle - \langle I_{B3} \rangle \langle I_{A4} \rangle}{\sqrt{\langle I_{B3}^2 \rangle - \langle I_{B3} \rangle^2} \sqrt{\langle I_{A4}^2 \rangle - \langle I_{A4} \rangle^2}}, \quad (27)$$

Якщо $k = 1$, то

$$\Delta\varphi = \arctan \left\{ \frac{(\cos \alpha_{42} - \cos \alpha_{43}) - 2(r_{24} - r_{34}) \cos \alpha_{41}}{(\sin \alpha_{42} - \sin \alpha_{43}) - 2(r_{24} - r_{34}) \sin \alpha_{41}} \right\}. \quad (28)$$

ВИСНОВКИ

Неруйнівний метод ФКСІ дає можливість реєструвати швидкоплинні процеси зміни НДС конструкційних матеріалів і елементів конструкцій під час динамічних навантажень. Тут для відтворення поля поверхневих переміщень достатньо зареєструвати лише одну СІ збудженої поверхні. Швидкісною цифровою камерою можна відстежувати зміну поля переміщень і деформацій поверхні впродовж усього періоду дії навантаження. Наприклад, якщо тривалість ударного навантаження ділянки досліджуваної поверхні становить 0,01 s, то за допомогою швидкісної 12-бітрової цифрової камери “Photron FASTCAM Mini AX200” можна записати 64 цифрові СІ ділянки поверхні розмірністю 1024×1024 пікселів, які фіксуватимуть послідовну зміну поля переміщень ділянки поверхні з часовим проміжком між кадрами 156 μs. Використовуючи перший і другий (3≠,1)+ПК алгоритми, кожен із 64 фрагментів поля переміщень можна відтворити, якщо записати три СІ цієї ж ділянки поверхні до динамічного навантаження. Швидкодію багатьох цифрових камер вдається підвищити, зменшуючи розмірність зображень. Зокрема, за допомогою цієї ж камери за такий же проміжок часу 0,01 s можна зареєструвати 200 СІ розмірністю 512×512 пікселів, і тоді часові проміжки між кадрами становитимуть 50 μs. За отриманими полями переміщень і деформацій поверхні можна оцінювати динамічну міцність матеріалу, визначити геометричні параметри зон пластичності та передруйнування, виявити небезпечні зони руйнування в елементах конструкцій, встановити місце і час зародження втомної макротріщини тощо.

1. Jones R. and Wykes C. Holographic and Speckle Interferometry. – Cambridge: Cambridge University Press, 1989. – 368 p.
2. Jacquot P. Speckle interferometry: a review of the principal methods in use for experimental mechanics applications // Strain. – 2008. – 44(1). – P. 57–69.
3. Муравський Л. І., Вороняк Т. І., Кметь А. Б. Лазерна інтерферометрія поверхні для потреб технічної діагностики / Наук. ред. акад. НАН України З. Т. Назарчук. – Львів: СПОЛОМ, 2014. – 272 с.
4. Laser speckle based digital optical methods in structural mechanics: A review / I. M. De la Torre, M. D. S. H. Montes, J. M. Flores-Moreno, and F. M. Santoyo // Opt. Lasers Eng. – 2016. – 87. – P. 32–58. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.02.008>
5. Технічна діагностика матеріалів і конструкцій: довідн. пос. у 8-ми т. Т. 3: Моніторинг напруженого стану елементів конструкцій з використанням електромагнітних хвиль оптичного діапазону / Л. М. Лобанов, Л. І. Муравський, В. А. Півторак, Т. І. Вороняк / За заг. ред. З. Т. Назарчука. – Львів: Простір-М, 2017. – 328 с.
6. Huntley J. M., Kaufmann G. H., and Kerr D. Phase-shifted dynamic speckle pattern interferometry at 1 kHz // Appl. Opt. – 1999. – 38, № 31. – P. 6556–6563.

7. *Active* microelement testing by interferometry using time-average and quasi-stroboscopic techniques / L. A. Salbut, K. Patorski, M. Jozwik, J. M. Kacperski, C. Gorecki, A. Jacobelli, and T. Dean // Proc. SPIE. Microsystems Engineering: Metrology and Inspection III. – 2003. – **5145**. – P. 23–32.
8. *Determination* of vibration amplitudes from binary phase patterns obtained by phase-shifting time-averaged speckle shearing interferometry / M. Kirkove, S. Guérit, L. Jacques, C. Loffet, F. Languy, J. F. Vandenrijt, and M. Georges // Appl. Opt. – 2018. – **57**, № 27. – P. 8065–8077.
9. Wang L. S. and Krishnaswamy S. Additive-subtractive speckle interferometry: extraction of phase data in noisy environments // Opt. Eng. – 1996. – **35**, № 3. – P. 794–801.
10. *Application* of stroboscopic and pulsed-laser electronic speckle pattern interferometry (ESPI) to modal analysis problems / H. Van der Auweraer, H. Steinbichler, S. Vanlanduit, C. Haberstok, R. Freymann, D. Storer, and V. Linet // Meas. Sci. Technol. – 2002. – **13**, № 4. – P. 451.
11. *Stroboscopic* digital speckle pattern interferometry for vibration analysis of microsystem / L. X. Yang, M. Schuth, D. Thomas, Y. H. Wang, and F. Voelsing // Opt. Lasers Eng. – 2009. – **47**, № 2. – P. 252–258.
12. *One-shot* phase stepping with a pulsed laser and modulation of polarization: application to speckle interferometry / G. Rodríguez-Zurita, A. García-Arellano, N. I. Toto-Arellano, V. H. Flores-Muñoz, R. Pastrana-Sánchez, C. Robledo-Sánchez, O. Martínez-Bravo, N. Vásquez-Pasmíño, and C. Costa-Vera // Opt. Express. – 2015. – **23**, № 18. – P. 23414–23427.
13. *Dynamic* parallel phase-shifting electronic speckle pattern interferometer / N. I. Toto-Arellano, G. A. Gómez-Méndez, A. Martínez-García, Y. Otani, D. I. Serrano-García, J. A. Rayas, G. Rodríguez-Zurita, and L. García-Lechuga // Appl. Opt. – 2020. – **59**, № 27. – P. 8160–8166.
14. *Phase-shifting* algorithms for electronic speckle pattern interferometry / C. C. Kao, G. B. Yeh, S. S. Lee, C. K. Lee, C. S. Yang, and K. C. Wu // Appl. Opt. – 2002. – **41**, № 1. – P. 46–54.
15. Bhaduri B., Kothiyal M. P., and Mohan N. K. A comparative study of phase-shifting algorithms in digital speckle pattern interferometry // Optik. – 2008. – **119**, № 3. – P. 147–152.
16. Schmitt D. R. and Hunt R. W. Optimization of fringe pattern calculation with direct correlations in speckle interferometry // Appl. Opt. – 1997. – **36**, № 34. – P. 8848–8857.
17. Wikipedia – Pearson correlation coefficient, https://en.wikipedia.org/wiki/Pearson_correlation_coefficient, last edited 30 April 2023.
18. Muravsky L., Kmet' A., and Voronyak T. Two approaches to the blind phase shift extraction for two-step electronic speckle pattern interferometry // Opt. Eng. – 2013. – **52**, № 10. – P. 101909–1–8.
19. Greivenkamp J. E. Generalized data reduction for heterodyne interferometry // Opt. Eng. – 1984. – **23**, № 4. – P. 350–352.
20. Ghiglia D. C. and Pritt M. D. Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software. – N.Y.: Wiley-Interscience, 1998. – 494 p.
21. А. с. 256867 СССР. Способ измерения фазового сдвига / В. Д. Молодов, Ю. Н. Бобков. – Опубл. 11.11.1969; Бюл. № 35.
22. Van Brug H. Phase-step calibration for phase-stepped interferometry // Appl. Opt. – 1999. – **38**, № 16. – P. 3549–3555.
23. Muravsky L., Kotsiuba Yu., and Kulynych Ya. Estimation of unknown phase shift between synthesized speckle interferograms using Pearson correlation coefficient // Proc. 2020 IEEE 15th Int. Conf. on Computer Sci. and Information Technol. (CSIT). – 2. – P. 58–61. Date Added to IEEE Xplore: 21 January 2021.
24. *Three-step* interferometric method with blind phase shifts by use of interframe correlation between interferograms / L. I. Muravsky, A. B. Kmet', I. V. Stasyshyn, T. I. Voronyak, Ya. V. Bobitski // Opt. Lasers Eng. – 2018. – **105**. – P. 27–34.
25. Muravsky L. I. Three-step electronic speckle pattern interferometry method with arbitrary phase shifts of reference wave // Відбір і обробка інформації. – 2019. – Вип. 47 (123). – С. 54–58.
26. Goodman J. W. Speckle phenomena in Optics: Theory and Applications, 2-nd Ed. – SPIE Press Books, 2020. – 468 p.
27. Holder L., Okamoto T., and Asakura T. A digital speckle correlation interferometer using an image fibre // Meas. Sci. Technol. – 1993. – **4**, № 7. – P. 746–753.
28. Wikipedia – Atan2. <https://en.wikipedia.org/wiki/Atan2>

Одержано 03.03.2023