

УДК 620.179+620.19+681.787

РОЗВИТОК ОПТИКО-ЦИФРОВИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ПОВЕРХНІ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ ПОТРЕБ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

З. Т. НАЗАРЧУК, Т. І. ВОРОНЯК, Л. І. МУРАВСЬКИЙ

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

Проаналізовані оптико-цифрові методи контролю поверхні елементів конструкцій, розвинуті у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України для потреб технічної діагностики. Методи засновані на принципах фазозсувної інтерферометрії (ФЗІ), цифрової спекл-інтерферометрії (ЦІІ) та цифрової кореляції зображень (ЦКЗ). Оцінено переваги методів дво- та трикрокової ФЗІ з довільними зсувами фази опорного променя проти традиційних. На основі методу трикрокової ФЗІ створено 3D профілометр для вимірювання параметрів шорсткості і хвилястості поверхні. Розроблено метод фазозсувної ЦІІ, що здатний лише за двома парами спекл-інтерферограм відтворювати поле переміщень поверхні. Метод використано для розв'язування різних задач технічної діагностики, зокрема, для виявлення прихованих отворів і дефектів у металічних зразках та зварних з'єднаннях. Методами ЦКЗ визначено поля переміщень поверхні поблизу берегів тріщин та інших концентраторів напружень, коефіцієнти інтенсивності напружень, J -інтеграл, напрям поширення тріщини, межі зони пластичності під час навантаження зразка. Для встановлення 3D полів переміщень розроблено новий метод 3D ЦКЗ, за допомогою якого виміряно деформації поверхні паливного бака ракети-носія.

Ключові слова: *фазозсувна інтерферометрія, цифрова спекл-інтерферометрія, цифрова кореляція зображень, рельєф поверхні, поле переміщень поверхні.*

Optical-digital methods for control of the structural elements surface that have been developed in H. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine for technical diagnostics are considered. These methods are based on the principles of phase shifting interferometry (PSI), digital speckle pattern interferometry (DSPI) and digital image correlation (DIC). The advantages of the developed methods of two- and three step PSI with arbitrary phase shifts of a reference wave in comparison with conventional PSI techniques, in particular, their simple technical implementation and high speed, are analyzed. A 3D profilometer for measuring the roughness and waviness parameters is developed on the basis of the three step PSI. The phase shifting DSPI method that allows us to restore the surface displacement field using only two pairs of speckle interferograms is developed. This method is used to solve different tasks of technical diagnostics including detection of hidden holes and defects in metal specimens and welded joints. Due to the proposed optical-digital speckle correlation method, it is possible to determine the displacement fields of the surface near uneven crack edges and other stress concentrators. Using the DIC method, new methodologies have been developed for definition of stress intensity factor, J -integral, crack propagation direction, plastic zone boundaries under specimen loading. To determine 3D displacement fields, a new 3D DIC method has been elaborated and used to measure the surface deformations of a launch vehicle fuel tank.

Keywords: *phase shifting interferometry, digital speckle pattern interferometry, digital image correlation, surface relief, surface displacement field.*

Вступ. Оптико-цифрові методи для потреб технічної діагностики ґрунтуються на алгоритмах формування і паралельного перенесення оптичних полів та їх цифровій обробці, щоб виділити необхідну інформацію про технічний стан об'єктів досліджень. Для вивчення мікроструктури поверхні, дефектів, поверхневих мікропереміщень і деформацій, за якими можна аналізувати фізико-механічні характеристики матеріалів та елементів конструкцій на макро- і мікрорівнях, успішно використовують такі потужні методи оптичної метрології, як фазозсувна інтерферометрія (ФЗІ), цифрова спекл-інтерферометрія (ЦСІ) та цифрова кореляція зображень (ЦКЗ), які розвиваються у ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України. Зупинимось детальніше на здобутках у їх розвитку за останні роки.

Часова фазозсувна інтерферометрія. Методи ФЗІ швидко розвинулись через запровадження нових ефективних засобів програмно-апаратного забезпечення, зокрема, відеокамер та персональних комп'ютерів нового покоління [1]. Важливу роль тут відіграють алгоритми оброблення оцифрованих інтерферограм та фазових мап (ФМ) рельєфу поверхні. Створення нових алгоритмів та вдосконалення відомих – актуальний напрямок досліджень, оскільки від їх ефективності та швидкодії залежить якість відтвореного рельєфу поверхні.

У ФЗІ рельєф досліджуваної ділянки поверхні відтворюють, реєструючи декілька інтерферограм та обробляючи їх за певним алгоритмом для побудови згорнутої циклічної ФМ відтвореного рельєфу та її розгортання (дециклізації) з подальшим перетворенням у мапу висот. Кожну інтерферограму можна описати так:

$$I(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\varphi_o(x, y) - \varphi_r(x, y) + \delta_k] = \\ = I'(x, y) \{1 + V(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \delta_k]\}, \quad (1)$$

де $\varphi(x, y) = \varphi_o(x, y) - \varphi_r(x, y)$ – різниця між фазами $\varphi_o(x, y)$ та $\varphi_r(x, y)$ предметного та опорного променів у двопроменевому інтерферометрі, яка невідома у кожній точці (x, y) відтворюваної ФМ $\varphi(x, y)$; $I'(x, y) = I_o(x, y) + I_r(x, y)$ – середня інтенсивність інтерферограми (низькочастотний фон); $I_o(x, y)$ і $I_r(x, y)$ – інтенсивність предметного і опорного променів; $I''(x, y) = 2\sqrt{I_o(x, y)I_r(x, y)}$ – функція видності; δ_k – фазовий зсув одного з двох променів (як правило, опорного); $V(x, y) = \frac{I''(x, y)}{I'(x, y)}$ –

видність інтерференційних смуг. Рівняння (1) містить три невідомі величини I' , I'' або V та фазу φ . Тому для обчислення останньої у кожній точці (або у кожному i, j -му пікселі) необхідно мати хоча б три інтерферограми, які описує це рівняння, причому фазовий зсув для кожної повинен бути відомим.

Методи дво- і трикрокової ФЗІ з довільним зсувом фази між інтерферограмами. Традиційні алгоритми, розроблені в останні десятиліття [1], передбачають реєстрацію серії з трьох і більше інтерферограм поверхні із послідовними відомими і однаковими фазовими зсувами δ_k ($k = 1, 2, \dots$) між опорним і предметним променями. Запропоновано п'яти- і багатокрокові алгоритми, що забезпечують малі похибки навіть за значних відхилень фазових зсувів від заданих значень [1]. Однак під час їх реалізації використовують відкалібрований прецизійний фазозсувний пристрій, який забезпечує задані однакові фазові зсуви опорного або предметного променів. Ціна такого пристрою з відповідним програмним забезпеченням може перевищувати вартість усіх інших вузлів та елементів інтерферометра. Крім того, багатокроковими методами ФЗІ не вдається оперативно реєструвати серію інтерферограм швидкоплинних процесів.

В останні роки для спрощення реалізації та підвищення швидкодії методів ФЗІ почали розробляти нові двокрокові фазозсувні алгоритми з невідомим фазо-

вим зсувом [2–4]. Серед них – алгоритм калібрування фазового зсуву [2], який вдосконалили Муравський та ін. [5, 6]. Його суть – визначити коефіцієнт парної кореляції Пірсона між двома інтерферограмами $I_1(x, y)$ та $I_2(x, y)$, який можна розглядати як косинус кута фазового зсуву між ними. Якщо, наприклад, отримали дві оцифровані інтерферограми $I_1(i, j)$ та $I_2(i, j)$, що відрізняються лише зсувом опорного променя на кут α , тобто

$$\left. \begin{aligned} I_1(i, j) &= I'(i, j) + I''(i, j) \cos[\varphi(i, j)] = I'(i, j) \{1 + V(i, j) \cos[\varphi(i, j)]\} \\ I_2(i, j) &= I'(i, j) + I''(i, j) \cos[\varphi(i, j) + \alpha] = I'(i, j) \{1 + V(i, j) \cos[\varphi(i, j) + \alpha]\} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

тоді [5, 6]

$$\alpha = \arccos \frac{\langle (I_1(i, j) - \langle I_1(i, j) \rangle) (I_2(i, j) - \langle I_2(i, j) \rangle) \rangle}{\sigma_{I_1} \sigma_{I_2}}, \quad (3)$$

де $\langle I_{1,2}(i, j) \rangle$ – середні значення багатовимірних векторів, що відповідають інтерферограмам $I_{1,2}(i, j)$; i, j – координати пікселів в оцифрованих інтерферограмах ($0 \leq i \leq N - 1$, $0 \leq j \leq M - 1$), які надалі опускатимемо; $\varphi(i, j)$ – значення фази в i, j -му пікселі; σ_{I_1} і σ_{I_2} – середньоквадратичні відхилення (с.к.в.) розподілів інтенсивності $I_1(i, j)$ та $I_2(i, j)$.

Для тестової фазової поверхні $z = \text{peaks}(x, y)$ у пакеті прикладних програм MATLAB проаналізовано [6] систематичні похибки визначення кута α за різних с.к.в. R_q шорсткості поверхні. Виявили, що для заданого фазового зсуву $\alpha = 30^\circ$ похибка $\Delta\alpha$ зменшується зі збільшенням значення R_q і за $R_q > \lambda/15$ не перевищує $0,3^\circ$. Аналіз систематичних похибок екстрагування невідомого фазового кута α став основою для розроблення двокрокового методу ФЗІ з довільним зсувом опорного променя [6, 7]. Він дає змогу розділити відтворений рельєф поверхні на два складники – шорсткість і хвилястість. З цією метою використали гаусівський низькочастотний фільтр [8], який розділяє повний рельєф на шорсткість та хвилястість, а також так званий R_k фільтр [8], що здійснює двокрокову гаусову коригувальну фільтрацію. Для 3D рельєфу поверхні застосували гаусівський або R_k фільтр з передавальними характеристиками, що володіють круговою симетрією. Щоб зменшити похибки у відтворених ФМ шорсткості і хвилястості, в алгоритм вводили другу ітерацію реконструкції ФМ повного рельєфу поверхні. Аналіз систематичних і випадкових похибок відтворення тестової поверхні засвідчив ефективність запропонованого методу для реконструкції рельєфу поверхні, середнє арифметичне значення шорсткості S_a якої не перевищувало $\lambda/8$. Якщо припустити, що в інтерферометрі довжина хвилі лазерного променя $\lambda = 633 \text{ nm}$, то ним можна відтворювати поверхні від 14 до 11 класів їх шорсткості [9].

Хоча метод двокрокової ФЗІ має низку переваг проти традиційних, де використовують однакові та фіксовані фазові зсуви, однак, володіє недоліками, які утруднюють його використання під час дослідження кінетики зміни текстури поверхні. Зокрема, вимагає додаткової реєстрації опорного і предметного променів, що ускладнює оптичну схему інтерферометра та режим його роботи. Для пришвидшення запису інтерферограм запропоновано метод трикрокової ФЗІ з довільними фазовими зсувами опорного променя [10].

Процедуру його реалізації можна умовно розділити на два етапи. На першому у комп'ютері реєструють три інтерферограми рельєфу ділянки поверхні I_1 , I_2 та I_3 , причому інтерферограми I_2 та I_3 відрізняються від I_1 лише довільними фазовими зсувами α_{21} і α_{31} опорного променя, тобто

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= I' \{1 + V \cos(\varphi)\} \\ I_2 &= I' \{1 + V \cos(\varphi + \alpha_{21})\} \\ I_3 &= I' \{1 + V \cos(\varphi + \alpha_{31})\} \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Для знаходження фази φ у кожному i, j -му пікселі відтвореної ФМ у виразі (4) обчислюють значення α_{21} і α_{31} , використовуючи такий же кореляційний підхід, як і у методі двокрокової ФЗІ [5–7], і зводять систему трьох рівнянь (4) до двох:

$$\left. \begin{aligned} \frac{I_2 - I'}{I_1 - I'} &= \cos \alpha_{21} - \tan \varphi \sin \alpha_{21} \\ \frac{I_3 - I'}{I_1 - I'} &= \cos \alpha_{31} - \tan \varphi \sin \alpha_{31} \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

Звідси отримують зашумлену (чорнову) ФМ рельєфу ділянки поверхні:

$$\varphi_n(k, l) = \arctan\left(-\frac{c}{b}\right), \quad (6)$$

де $b = (I_1 - I_3) \sin \alpha_{21} + (I_2 - I_1) \sin \alpha_{31}$; $c = I_2 - I_3 + (I_3 - I_1) \cos \alpha_{21} + (I_1 - I_2) \cos \alpha_{31}$.

На другому етапі формують кінцеву ФМ рельєфу поверхні, позбавлену шумів і завад, яку розділяють на ФМ шорсткості і хвилястості за алгоритмом, подібним до алгоритму відтворення рельєфу для двокрокового методу ФЗІ.

Визначення розмірів втомної зони передруйнування. Розроблені методи дво- і трикрокової ФЗІ використовували для високоточного встановлення розмірів втомної зони передруйнування (ВЗП), а також циклічної і монотонної пластичних зон в елементах конструкцій з вирізами за циклічних навантажень. Вивчити структурні параметри цих зон важливо, щоб оцінити довговічність та встановити залишковий ресурс так навантажуваних елементів. Для розрахунку довговічності найважливіше точно визначити розмір d^* ВЗП [11, 12], від чого залежить достовірність оцінювання коефіцієнта концентрації циклічних напружень K_f [11], а відтак, втомної довговічності $N_f = N_i + N_p$ елементів конструкцій з геометричними концентраторами напружень [12], де N_i – період до зародження втомної макротріщини; N_p – період її субкритичного росту. Для знаходження розмірів ВЗП для металів і сплавів незалежно від їх пластичності запропоновано критерій, заснований на гіпотезі, що максимальна шорсткість поверхні досягається на межі цієї зони [13]. Графічно проілюстрували цей критерій у праці [13]. Його вірогідність підтверджують результати, отримані раніше [14–16], де зафіксували, що шорсткість поверхні пов'язана з концентрацією напружень під час втоми матеріалів. З іншого боку, Осташ і Панасюк [11] встановили, що на межі ВЗП досягається максимум розмаху локальних напружень $\Delta\sigma_y^*$, який пропорційний величині K_f . Оскільки значення $\Delta\sigma_y^*$ зареєстровано на віддалі d^* від краю вирізу [11, 12], то можна стверджувати, що на межі ВЗП шорсткість поверхні буде максимальна. Таким чином, розміри ВЗП можна віднайти, якщо обчислити просторовий розподіл середнього арифметичного значення висоти поверхні обмеженого масштабу S_a у кожному пікселі ділянки поверхні поблизу краю вирізу.

Еволюцію шорсткості поверхні біля вирізу за циклічних навантажень оцінювали, обчислюючи просторовий розподіл шорсткості S_a у кожному пікселі мапи висот рельєфу $h(i, j)$ [13]. У 3D просторі

$$S_a(i', j') = \frac{1}{PQ\Delta_x\Delta_y} \sum_{\left(i'=i-p+\frac{P-1}{2}\right)} \sum_{\left(j'=j-q+\frac{Q-1}{2}\right)} |h(i, j)| \Delta_x \Delta_y, \quad (7)$$

де $p=0, \dots, P-1$ і $q=0, \dots, Q-1$ – номери пікселів у базовій площі $L_x \times L_y$ ($L_x = P\Delta_x$, $L_y = Q\Delta_y$, $P = Q$, $\Delta_x = \Delta_y$, P і Q – непарні числа); Δ_x , Δ_y – кроки між пікселами.

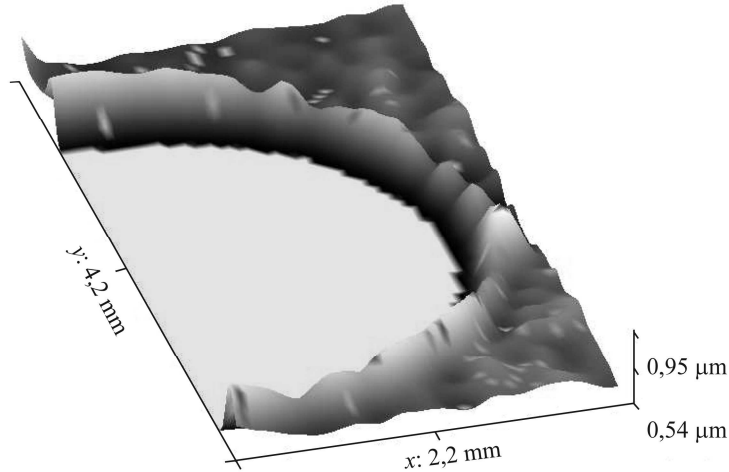


Рис. 1. Реконструйована мапа просторового розподілу шорсткості $S_a(i', j')$ для ділянки поверхні зразка, виготовленого зі сталі 08кп, після 5 000 циклів навантаження.

Fig. 1. Reconstructed map of the roughness $S_a(i', j')$ spatial distribution for the surface area of the 08kp steel specimen after 5000 loading cycles.

За результатами обчислення величини S_a у кожному пікселі мапи висот $h(k, l)$ будували просторовий її розподіл $S_a(i', j')$, максимальні значення якого формують шукану межу ВЗП у вигляді тонкої смуги поблизу краю вирізу, віддаль від якого до максимального значення наведеної шорсткості і є розміром d^* . Результат реконструкції мапи висот рельєфу $h(x, y)$ і обчислення просторового розподілу S_a для ділянки поверхні компактного зразка (СТ-зразка) завтовшки 3 мм, виготовленого зі сталі 08кп, поблизу круглого вирізу після 5 000 циклів навантаження розтягом (коефіцієнт асиметрії $R = P_{\min} / P_{\max} = 0,1$, $\Delta\sigma_y(0) = 560$ МПа) ілюструє рис. 1. Тут чітко видно ВЗП у вигляді тонкої смуги максимальних значень S_a навколо краю вирізу, оскільки найбільші висоти рельєфу поверхні досягаються на межі ВЗП ($d^* = 210$ μm). Подібні результати для зразків зі сталі 08кп та алюмінієвих сплавів Д16Т і В95Т отримано раніше [13, 17].

Виявлення місця та моменту виникнення втомної макротріщини. Один із важливих напрямів досліджень втомного руйнування металевих зразків – встановити місце і час появи втомної макротріщини. Під час оцінювання втомної довговічності N_f елементів конструкцій з геометричними концентраторами напружень найпроблематичніше визначити період N_i до її зародження [18]. Деякі дослідники намагались передбачити місце і час виникнення макротріщини, беручи за індикатор її зародження певне накопичення циклічних смуг ковзання [19, 20]. Однак у працях [16, 21] доведена сумнівність такого підходу. Водночас за результатами оброблення інтерферограм та реконструкції рельєфів нанощорстких поверхонь компактних зразків, виготовлених зі сталі 08кп та алюмінієвого сплаву Д16Т, встановили [7, 17], що після певної кількості циклів макротріщина ви-

никає у місці, де найбільший приріст шорсткості нанорельєфу під час прикладання циклічних навантажень.

Такий висновок підтверджують наведені раніше [7, 17] ФМ нанорельєфів для компактного зразка, виготовленого зі сталі 08кп, за різної кількості циклів навантаження аж до появи тріщини у проміжку між 24 000 та 27 000 циклами саме з того місця, де найбільше змінювалась шорсткість вже під час 10 000 та 20 000 циклів. Наведено [17] залежності с.к.в. шорсткості R_q від кількості циклів N_i для трьох профілів поверхні у точках на краю ВЗП, які свідчать, що шорсткість поверхні у точці, що відповідає межі ВЗП для двох профілів 1 і 3, практично не залежить від параметра N_i . Водночас для профілю 2, що пролягає саме там, де зароджується тріщина, шорсткість на межі ВЗП монотонно зростає зі збільшенням кількості циклів до тих пір, доки на цьому місці не утвориться макротріщина.

Зауважимо, що незалежно від виконаних тут досліджень нову методику передбачення місця і моменту зародження втомної макротріщини у тонких зразках нікелю за максимальним зростанням шорсткості у цьому місці і припинення її збільшення після появи тріщини розробили J. F. Sola та ін. [16]. З її допомогою виявили місце і час зародження втомних тріщин у місцях стику трьох зерен або на межах зерен за максимальними значеннями індикатора пошкодження, який є різницею середніх арифметичних значень шорсткості на малому фрагменті різницевої поверхні. Від запропонованої ця методика відрізняється тим, що, по-перше, індикатор пошкодження визначають у межах заданого малого фрагмента, а не у кожному пікселі, і, по-друге, шорсткість оцінюють за індикатором пошкодження, а не за її приростом. Тому наш підхід забезпечує більшу роздільну здатність під час виявлення місця зародження тріщини та дає можливість відстежувати зростання параметрів шорсткості впродовж всього періоду N_i , за яким можна в будь-який момент фіксувати втомне руйнування після зупинки навантажувальної установки.

Таким чином, за результатами аналізу зміни шорсткості поверхні зразка під дією циклічних навантажень можна прогнозувати місце виникнення макротріщини та оцінювати період її зародження N_i . Найімовірніше, вона зароджується у тій ділянці ВЗП або біля неї, де приріст шорсткості нанорельєфу під час прикладання навантажень найбільший.

3D оптичний профілометр. Макет такого профілометра створили на основі нового швидкісного методу трикрокової ФЗІ з довільними зсувами фази опорного променя для відтворення рельєфу наношорсткої поверхні та визначення параметрів шорсткості і хвилястості [22]. Для цього використали бінокулярний мікроскоп типу МБС, який поєднує інтерферометричну насадку та відеокамеру (рис. 2). Керують плавним зсувом опорного променя, реєструють інтерферограми та обробляють їх за допомогою створеного програмного забезпечення. 3D профілометром контролюють та відстежують зміни рельєфу поверхні конструкційних матеріалів за навантажень та впливу агресивних середовищ.

Основні параметри і характеристики макета 3D профілометра такі: лінійне поле зору 3...34 mm; вимірювана шорсткість $S_a = 0,01...0,12 \mu\text{m}$; вимірювана хвилястість 0,140 μm ; час вимірювання та отримання результатів ≤ 1 s. Пристрій призначений для розв'язування задач експериментальної механіки руйнування [18, 23] і дає змогу оперативно відстежувати кінетику поведінки поверхні зразків під час їх статичних та циклічних навантажень.

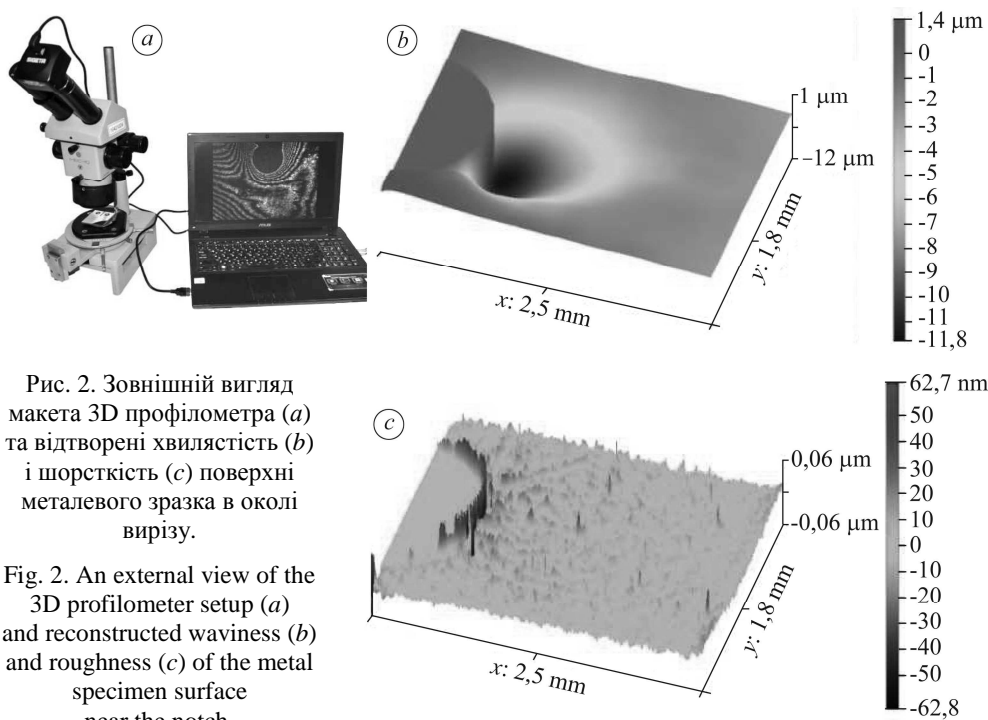


Рис. 2. Зовнішній вигляд макета 3D профілометра (a) та відтворені хвилястість (b) і шорсткість (c) поверхні металевого зразка в околі вирізу.

Fig. 2. An external view of the 3D profilometer setup (a) and reconstructed waviness (b) and roughness (c) of the metal specimen surface near the notch.

Цифрова спекл-інтерферометрія поверхні. Важливим напрямом оптичної метрології та неруйнівного контролю на сьогодні стала ЦІ, за допомогою якої визначають мікропереміщення і деформації поверхні матеріалів та елементів конструкцій. Методи ЦІ ґрунтуються на інтерференції когерентно-оптичного променя, що формує спекл-зображення поверхні в площині спостереження, з когерентним опорним променем, реєстрації отриманих інтерференційних картин, тобто спекл-інтерферограм (СІ), та встановленні просторового поля переміщень поверхні за допомогою введених у комп'ютер СІ. Сформовані в оптичному інтерферометрії СІ реєструють за різних навантажень об'єкта контролю і після їх цифрового оброблення визначають поля переміщень і деформацій поверхні. Реєструють два типи переміщень поверхні – тангенціальні (у площині) та нормальні (від площини). Розрізняють кореляційні і фазозсувні методи ЦІ. Кореляційні базуються на встановленні кореляції між СІ за двох різних типів навантаження. Оскільки кореляція двох СІ трудомістка, її, як правило, замінюють попіксельним відніманням або додаванням СІ. Чутливість цих методів не перевищує половини довжини хвилі лазерного променя у спекл-інтерферометрії, тому їх використовують для оцінювання переміщень поверхні за різних типів навантажень.

На відміну від кореляційних, методи часової та просторової фазозсувної ЦІ застосовують для прецизійного аналізу поверхневих мікропереміщень. Тут реєструють декілька (не менше трьох) СІ ділянки поверхні у її початковому стані та стільки ж після її навантаження. Просторова різниця між цими станами поверхні ідентична полю переміщень. Дві серії СІ (до і після навантаження) можна подати у такому вигляді:

$$\left. \begin{aligned} s_{1,k}(x, y) &= s'(x, y) + s''(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \delta_k] \\ s_{2,k}(x, y) &= s'(x, y) + s''(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \Delta\varphi(x, y) + \delta_k] \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

де $s' = i_o + i_r$; $s'' = 2\sqrt{i_o i_r}$; $i_o(x, y)$ та $i_r(x, y)$ – інтенсивність предметного і опорного променів; $\varphi(x, y)$ – випадкова фаза, що описує фазовий розподіл шорсткості поверхні; $\Delta\varphi(x, y)$ – приріст фази внаслідок деформації ділянки поверхні; δ_k – k -й фазовий зсув між опорним і предметним променями. При цьому різниця між фазовими зсувами $\Delta\delta_k = \delta_{k+1} - \delta_k$ повинна бути однаковою, що вимагає прецизійного калібрування фазозсувних пристроїв.

Для спрощення та пришвидшення запису СІ запропоновано метод двокрокової фазозсувної ЦСІ з довільним фазовим зсувом кута α між опорним і предметним променями [24, 25]. Тут використовують лише дві цифрові СІ – $s_1(i, j)$ та $s_2(i, j)$ ділянки поверхні у вихідному стані, що відрізняються тільки довільним фазовим зсувом α , та дві СІ – $s_3(i, j)$ і $s_4(i, j)$ тієї ж ділянки у деформованому стані, що різняться таким же фазовим зсувом кута α [7, 24, 25]. Обчислюють $\Delta\varphi(i, j)$ за виразом [24]

$$\Delta\varphi(i, j) = 2 \arctan \left[\frac{\sum_{l=1}^4 p_l s_l(i, j)}{\sum_{l=1}^4 q_l s_l(i, j)} \right] \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}, \quad (9)$$

де $p_1 = p_2 = q_1 = q_3 = 1$, $p_3 = p_4 = q_2 = q_4 = -1$.

Щоб визначити кут α довільного фазового зсуву, використовували такий самий кореляційний підхід, як і у методах дво- і трикрокової ФЗІ з довільними фазовими зсувами опорного променя. Лише замість інтерферограм у формулі (3) застосовували СІ. Результати комп'ютерного моделювання вказують на малу сумарну похибку відтворення $\Delta\varphi(i, j)$.

Для реалізації цього методу розроблено експериментальні установки, що містять навантажувальні пристрої та інтерферометри Тваймана–Гріна, Маха–Цендера та Ліндерця. У праці [7] наведені поля нормальних переміщень поверхні сталевого балкового зразка з косим надрізом, який невидимий на поверхні з місця реєстрації СІ. Поля переміщень одержали методом двокрокової фазозсувної ЦСІ. Вихідні СІ отримували за початкового навантаження 2500 N, а кінцеві – за додаткового 300 N.

Хоча метод різницевої ЦСІ низькочутливий, однак, через просту технічну реалізацію найчастіше вживаний під час неруйнівного контролю елементів конструкцій за різних видів навантажень. Зокрема, для аналізу відшарувань у захисних і відновлювальних покриттях, виявлення підповерхневих тріщин біля концентраторів напружень та дефектів зварних з'єднань, встановлення полів нормальних і тангенціальних переміщень поверхні консольно закріпленої металеві балки за поперечного згину [7, 17], визначення деформацій зминання біля круглого отвору у зразках вуглепластикового шаруватого композита [26].

Цифрова кореляція зображень. В останні роки інтенсивно розвиваються методи неруйнівного контролю елементів конструкцій, що базуються на ЦКЗ [27, 28]. Порівняно з ЦСІ вони забезпечують вищий діапазон вимірювань полів переміщень поверхні, але не оперують фазовою інформацією про оптичні поля, тому їх чутливість значно менша. Однак прості засоби і алгоритми реєстрації та оброблення зображень сприяють їх застосуванню для технічної діагностики різноманітних об'єктів у натурних умовах. Розроблено як 2D, так і 3D методи ЦКЗ. Тангенціальні поля переміщень поверхні реконструюють першими, а нормальні і тангенціальні – другими. Поля переміщень поверхні формують кореляційним порівнянням m, n -го фрагмента i_{2mn} спекл-зображення або зображення пофарбованої ділянки i_2 деформованої поверхні зразка з відповідним m, n -м фрагментом i_{1mn}

зображення i_1 цієї ж поверхні у початковому стані. Для цього два зображення i_1 та i_2 реєструють і вводять у комп'ютер, де розбивають на $M \times N$ квадратних фрагментів. Внаслідок взаємної кореляції кожної пари фрагментів i_{1mn} та i_{2mn} формується кореляційний пік, вектор переміщення якого відповідає вектору переміщення \vec{d}_{mn} фрагмента i_{2mn} відносно фрагмента i_{1mn} . Матриця цих векторів розмірністю $M \times N$ формує поле переміщень ділянки поверхні.

Методи ЦКЗ не дають можливості реєструвати поля переміщень поверхні близько від берегів тріщин, концентраторів напружень та нерівних країв зразків, оскільки використовують лише квадратні фрагменти. Щоб подолати ці проблеми, розробили методи адаптивної сегментації зображень для формування фрагментів неправильної форми [29]. Модифікований метод оптико-цифрової спекл-кореляції з використанням фільтра дробового степеня для адаптивної сегментації спекл-зображень поверхні і формування фрагментів неправильної форми запропонований раніше [30]. Процедура адаптивної сегментації містить декілька кроків, зокрема, бінаризацію зображень методом Оцу, морфологічну ерозію, морфологічне розрідження, маркування зв'язних компонентів та декомпозицію Вороного. Після сегментації спекл-зображень визначають поля переміщень поверхні, у тому числі близько від берегів тріщин та інших нерівних країв. Результати кореляційного оброблення спекл-зображень наведені у праці [30].

У ФМІ розробили також нові методики визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень, J -інтеграла, напряму поширення тріщини, меж зони пластичності під час навантаження зразка методом 2D ЦКЗ [17, 26, 31]. Їх використано для встановлення напряму поширення тріщин під час діагностування стану навантажених металоконструкцій козлового крана.

Для визначення 3D полів переміщень розробили новий метод 3D ЦКЗ, де застосовували лог-полярне перетворення Фур'є–Мелліна, щоб усунути просторові спотворення, викликані нормальними переміщеннями поверхні під час побудови полів деформацій [32]. Тут використовують лише одну відеокамеру для реєстрації 3D переміщень поверхні, в той час як у відомих аналогах – одночасно дві. На його основі створили методику вимірювання деформацій поверхні паливного бака ракети-носія для оцінювання критичних деформацій і визначення допустимого тиску у ньому.

Переносний оптико-цифровий спекл-корелятор (ОЦСК), створений у ФМІ [28], неодноразово вдосконалювали, щоб реалізувати описані вище методи [26]. Модифікований прилад використовують для технічного діагностування елементів конструкцій. Він може працювати як в автономному режимі, так і разом із навантажувальними установками, даючи змогу визначати механічні характеристики елементів конструкцій за різних видів навантажень.

ВИСНОВКИ

Створені оптико-цифрові методи і засоби технічної діагностики дають можливість розробляти нові швидкісні підходи до вивчення фізико-механічних властивостей матеріалів та оцінювання залишкового ресурсу елементів конструкцій довготривалої експлуатації. Макети 3D профілометра та ОЦСК, а також опрацьовані методики виявлення підповерхневих дефектів за динамічними змінами спекл-зображень поверхні композитів, визначення допустимих напружень зминання у багаторядних болтових з'єднаннях "композит–метал" та вимірювання деформацій поверхні паливного бака ракети-носія впроваджують на провідних авіакосмічних підприємствах України.

1. *Schreiber H. and Brunning J. H. Phase shifting interferometry // Optical Shop Testing / Ed.: D. Malacara. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2007. – Chapter 14. – P. 547–666.*

2. *Van Brug H.* Phase-step calibration for phase-stepped interferometry // *Appl. Opt.* – 1999. – **38**, № 16. – P. 3549–3555.
3. *Saïde D., Trusiak M., and Patorski K.* Evaluation of adaptively enhanced two-shot fringe pattern phase and amplitude demodulation methods // *Appl. Opt.* – 2017. – **56**, № 19. – P. 5489–5500.
4. *Two-step* phase shifting algorithms: where are we? / H. Flores, A. Reyes-Figueroa, C. Carrillo-Delgado, M. Rivera // *Opt. Laser Techn.* – 2020. – **126**. – P. 106105.
5. *Two-frame* phase shifting interferometry for retrieval of smooth surface and its displacements / L. I. Muravsky, O. P. Ostash, A. B. Kmet', T. I. Voronyak, and I. M. Andreiko // *Opt. Lasers Eng.* – 2011. – **49**, № 3. – P. 305–312.
6. *Muravsky L. I., Kmet' A. B., and Voronyak T. I.* Retrieving the relief of a low-roughness surface using a two-step interferometric method with blind phase shift of a reference wave // *Opt. Lasers Eng.* – 2012. – **50**, № 11. – P. 1508–1516.
7. *Муравський Л. І., Вороняк Т. І., Кметь А. Б.* Лазерна інтерферометрія поверхні для потреб технічної діагностики / *Наук. ред. акад. НАНУ З. Т. Назарчук.* – Львів: Сполом, 2014. – 272 с.
8. *Raja J., Muralikrishnan B., and Fu S.* Recent advances in separation of roughness, waviness and form // *Precis. Eng.* – 2002. – **26**, № 2. – P. 222–235.
9. *ГОСТ 11141-84.* Детали оптические. Классы чистоты поверхностей. Методы контроля. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 24 с.
10. *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, and Y. V. Bobitski // *Opt. Lasers Eng.* – 2018. – **105**. – P. 27–34.
11. *Ostash O. P. and Panasyuk V. V.* Fatigue process zone at notches // *Int. J. Fatigue.* – 2001. – **23**, № 7. – P. 627–636.
12. *Остап О. П.* Нові підходи в механіці втомного руйнування // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2006. – **42**, № 1. – С. 13–25.
(*Ostash O. P.* New approaches in fatigue fracture mechanics // *Materials Science.* – 2006. – **42**, № 1. – P. 5–19.)
13. *Evaluation* of fatigue process zone dimensions in notched specimens by two-step phase shifting interferometry technique / L. I. Muravsky, P. Picart, A. B. Kmet', T. I. Voronyak, O. P. Ostash, and I. V. Stasyshyn // *Opt. Eng.* – 2016. – **55**, № 10. – P. 104108–1–9.
14. *Arola D. and Williams C. L.* Estimating the fatigue stress concentration factor of machined surfaces // *Int. J. Fatigue.* – 2002. – **24**, № 9. – P. 923–930.
15. *Modelling* the influence of machined surface roughness on the fatigue life of aluminium alloy / M. Suraratchai, J. Limido, C. Marbu, and R. Chieragatti // *Int. J. Fatig.* – 2008. – **30**, № 12. – P. 2119–2126.
16. *Predicting* crack initiation site in polycrystalline nickel through surface topography changes / J. F. Sola, R. Kelton, E. I. Meletis, and H. Huang // *Int. J. Fatig.* – 2019. – **124**. – P. 70–81.
17. *Технічна діагностика матеріалів і конструкцій: Довідн. пос. у 8-ми т. / За заг. ред. З. Т. Назарчука. 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.* – Львів: Простір-М, 2017. – 328 с.
18. *Panasyuk V. V.* Some urgent problems of the strength of materials durability of structures // *Mater. Sci.* – 2009. – **45**, № 2. – P. 141–161.
19. *Mughrabi H.* Cyclic slip irreversibilities and the evolution of fatigue damage // *Metall. Mat. Trans. B.* – 2009. – **40**, № 4. – P. 431–453.
20. *Boeff M., Hassan H. U., and Hartmaier A.* Micromechanical modeling of fatigue crack initiation in polycrystals // *J. Mater. Res.* – 2017. – **32**, № 23. – P. 4375–4386.
21. *Risbet M. and Feaugas X.* Some comments about fatigue crack initiation in relation to cyclic slip irreversibility // *Eng. Fract. Mech.* – 2008. – **75**, № 11. – P. 3511–3519.
22. *Патент* України на корисну модель №137700. Інтерферометричний пристрій для контролю геометрії та відтворення рельєфу гладкої поверхні / Т. І. Вороняк, Л. І. Муравський, І. В. Стасишин, О. Г. Куць. – Бюл. № 21; Опубл. 11.11.2019.
23. *Назарчук З. Т., Никифорчин Г. М.* Структурна та корозійна механіка руйнування як складові фізико-хімічної механіки матеріалів // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2018. – **54**, № 1. – С. 17–30.

- (*Nazarchuk Z. T., Nykyforchyn H. M.* Structural and corrosion fracture mechanics as components of the physicochemical mechanics of materials // *Materials Science*. – 2018. – **54**, № 1. – P. 7–21.)
24. *Voronyak T. I., Kmet' A. B., Murav's'kyi L. I.* Визначення 3D полів переміщень за методом фазозсувної спекл-інтерферометрії // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2009. – **45**, № 3. – С. 43–48.
(*Voronyak T. I., Kmet' A. B., Murav's'kyi L. I.* Determination of the 3D fields of displacements by the method of phase-shifting speckle interferometry // *Materials Science*. – 2009. – **45**, № 3. – P. 372–377.)
 25. *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.
 26. *Nazarchuk Z. T. and Muravsky L. I.* Novel digital interferometry and image correlation techniques for nondestructive testing application // *Наука про матеріали: досягнення та перспективи: у 2-х т.* – К.: Академперіодика, 2018. – **2**. – С. 374–392.
 27. *Sutton M. A., Ortu J. J., and Schreier H.* Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications. – New York: Springer Science & Business Media, 2009. – 322 p.
 28. *Муравський Л. І.* Методи спекл-кореляції для дослідження механічних властивостей конструкційних матеріалів. – К.: Наук. думка, 2010. – 208 с.
 29. *Cofaru C., Philips W., and Van Paeppegem W.* A novel speckle pattern – adaptive Digital Image Correlation approach with robust strain calculation // *Opt. Lasers Eng.* – 2012. – **50**, № 2. – P. 187–198.
 30. *Визначення поля локальних переміщень методом цифрової спекл-кореляції з адаптивною сегментацією зображень / О. М. Сахарук, Л. І. Муравський, І. С. Голинський, О. В. Личак // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2014. – **49**, № 5. – С. 92–97.
(*Determination of the field of local displacements by the digital speckle correlation method with adaptive segmentation of the images / O. M. Sakharuk, L. I. Murav's'kyi, I. S. Holyn's'kyi, and O. V. Lychak // Materials Science.* – 2014. – **49**, № 5. – P. 660–666.)
 31. *Lychak O. V. and Holyn's'kiy I. S.* Improving the accuracy of derivation of the Williams' series parameters under mixed (I+II) mode loading by compensation of measurement bias in the stress field components data // *Meas. Sci. Techn.* – 2016. – **27**, № 12. – P. 125203.
 32. *Maksymenko O. P. and Sakharuk O. M.* Improving the reliability of 2D DIC by using Fourier-Mellin transform // *Digital image correlation advanced methods and applications / Ed.: D. Chambers.* – Chapter 1. – P. 1–36. – N. Y.: Nova Science Publishers, Inc., 2017. – 114 p.

Одержано 21.10.2020