

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ СПЕКЛ-ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ З ПОБУДОВОЮ ФАЗОВОГО ПОРТРЕТА ДО ВИВЧЕННЯ ДИФУЗНИХ ОБ'ЄКТІВ

У статті розглянуто метод спекл-інтерферометрії з використанням несучих смуг та побудовою фазового портрета об'єкта. Використання цього методу дозволяє реєструвати стан поверхні об'єкта, візуалізувати локалізацію внутрішніх напружень та оцінювати величину зміщень при деформації. У поєднанні з цифровими засобами реєстрації та комп'ютерною обробкою отриманих спекл-інтерферограм даний метод дозволяє розробити сучасні методи неруйнуючого безконтактного контролю якості поверхонь в режимі реального часу. Аналіз отриманих результатів дозволив запровадити критерії якості поверхні у вигляді стандартного відхилення та рангу, за допомогою яких можна оцінити дефектність та робочий ресурс досліджуваного об'єкта.

Вступ

Існуючі методи та засоби контролю якості конструкцій, виявлення залишкових напружень і дефектів, таких як рентгенівський, акустичний тощо, не завжди відповідають певному комплексу вимог: висока точність вимірювань, безконтактний та неруйнуючий метод вимірювань, простота інтерпретації отриманих даних, можливість використання для широкого асортименту матеріалів. Ці вимоги необхідні для надійного та оперативного виявлення ослаблених ділянок та прогнозу місць майбутнього руйнування. Таким вимогам повністю відповідає метод спекл-інтерферометрії з використанням цифрових засобів реєстрації з високим розширенням, комп'ютерним аналізом спекл-інтерферограм та побудовою фазового портрета, що дає змогу візуалізувати фазовий рельєф деформації, який відображає розподіл внутрішніх напруг. На основі цих даних можна визначити якість поверхні виробу, знаходити місця локалізації концентратів механічних напруг і прогнозувати робочий ресурс виробу.

Метою роботи було виявлення внутрішніх напруг зразка методом спекл-інтерферометрії. Автором було досліджено об'єкт – металевий стержень. За допомогою серії вимірювань було обґрунтовано критерій якості у вигляді стандартного відхилення величини термоактивованого рельєфу поверхні від його середнього значення та рангу.

Методи та матеріали

Спекл-інтерферометрія – клас вимірювальних методів, при яких відбувається когерентне дода-

вання (інтерференція) поля, яке має спекл-структуру, з плоскою опорною хвилею або з іншим полем, яке має спекл-структуру. Метод спекл-інтерферометрії чутливий до тангенціальної компоненти переміщень. Точні та наглядні результати при вимірюванні переміщень зразка можна отримати при використанні електронних (цифрових) засобів реєстрації та комп'ютерних методів обробки отриманих спекл-картин. Ряд переваг можна отримати при використанні методу несучих смуг. Так, інтерференційні смуги усувають проблеми, пов'язані з нульовою інтерференційною смугою, з визначенням номеру робочої смуги та дозволяють суттєво полегшити обробку та інтерпретацію отриманих результатів.

Під час досліджень використовувався метод спекл-інтерферометрії, при якому відбувалося когерентне додавання двох полів, що мають спекл-структуру. Ці поля утворилися при освітленні об'єкта з двох напрямків. Результуюча картина не залежить від кута спостереження.

При когерентному додаванні двох спекл-картин, що мають однакову середню освітленість, статистичні характеристики результуючої спекл-картини будуть такими ж, як і у вихідних картин. У будь-якій точці площини зображення освітленості спекл-картини, що утворилась при освітленні об'єкта двома хвилями, можна записати так:

$$I = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\Delta\phi), \quad (1)$$

де a_1 , a_2 – дійсні амплітуди світлових хвиль, що приходять у дану точку в результаті розсіяння на

поверхні об'єкта кожної з освітлених хвиль, $\Delta\varphi$ – різниця фаз.

При зміщенні точки поверхні на невелику відстань L різниця фаз зміниться на величину δ . Зміна фази при розсіянні першої освітленої хвилі дорівнює: $\delta_1 = (k_3 - k_1)L$, для другої хвилі: $\delta_2 = (k_3 - k_2)L$.

Після зміщення чи деформації об'єкта освітленість спекл-картини матиме вигляд:

$$I = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\Delta\varphi + \delta), \quad (2)$$

де $\delta = (k_2 - k_1)L$; k_3, k_1 – хвильові вектори двох освітлювальних хвиль.

У роботі автором було досліджено об'єкт – металевий стержень діаметром 12 мм і довжиною 120 мм. Для аналізу деформацій поверхні стержня використовувався метод двох експозицій (рис. 1), як деформаційний вплив використовувалося низькотемпературне нагрівання об'єкта.

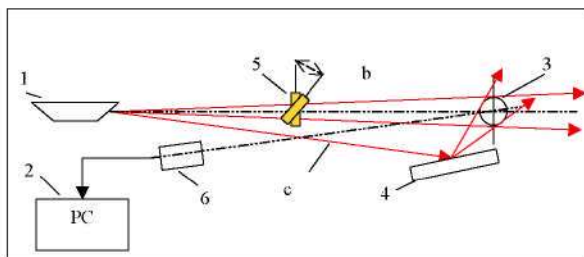


Рис. 1. Спекл-інтерферометр, з використанням двопроменевої схеми освітлення об'єкта: 1 – лазер, 2 – комп'ютер, 3 – об'єкт, 4 – дзеркало, 5 – фазова пластинка, 6 – CCD-камера

Дослід проводився у такій послідовності:

- Фотографування об'єкта у початковому стані (при вертикальному положенні фазової плоскопаралельної пластинки);
- Поворот плоскопаралельної пластинки на 20° (проти годинникової стрілки) та фотографування об'єкта при такому положенні фазової пластинки;
- Нагрівання стержня протягом 6 хвилин за допомогою кварцового нагрівника циліндричної форми;
- Реєстрація спекл-фотографій при охолодженні об'єкта (всього 18 фотографій через різні інтервали часу);
- Встановлення плоскопаралельної пластинки у вертикальне положення та фотографування охолодженого об'єкта.

Результати дослідів та їх обговорення

Таким чином, ми отримали набір спекл-фотографій об'єкта. Але такі спекл-картини незручні для аналізу деформацій об'єкта. Щоб отримати спекл-інтерферограми, спекл-картини піддають комп'ютерній обробці. Зображення

спеклів перетворюються у набір матриць, елементи яких відповідають інтенсивності спекл-картин об'єкта. Виберемо дві спекл-фотографії об'єкта: до нагрівання при вертикальному та нахиленому положенні пластинки. Від другої матриці віднімаємо першу, різниця сигналів підноситься до квадрата і виводиться на екран монітора. Таку ж операцію робимо для спекл-фотографій об'єкта в нагрітому стані. Для отримання спекл-інтерферограм потрібно віднімати спекл-фотографії, зроблені при різних положеннях фазової пластинки, тому використовуємо спекл-фотографію об'єкта у початковому стані (до нагрівання) при вертикальному розміщенні фазової пластинки та при нахиленому положенні пластинки для нагрітого об'єкта.

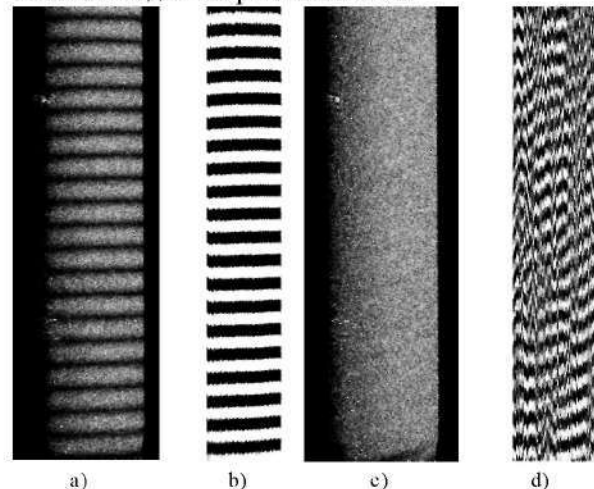


Рис. 2. Спекл-інтерферограми об'єкта із зображенням інтерференційних смуг: а), б) у початковому стані (до нагрівання) до та після комп'ютерної обробки; с), д) після нагрівання до 50° до та після комп'ютерної обробки

На ділянках, де контраст спеклів між двома записами не змінився, різниця сигналів дорівнює нулю і в зображенні з'явиться темна смуга. Ділянка, де контраст став зворотним, проявляється у вигляді яскравої області, модульованої спеклами (рис. 2).

Темні смуги є лініями постійних значень нормальних зміщень, що описуються таким виразом (рівняння темної смуги):

$$L_y = N\lambda / (2\sin(\Delta\theta)),$$

де θ – кут між освітлювальними променями.

За зовнішнім виглядом, розміщенням чи нахилом несучих смуг на спекл-інтерферограмі можна зробити висновки про характер та динаміку деформацій об'єкта, але ми не можемо визначити напрям деформації та локалізацію внутрішніх напруг за допомогою побудови фазового портрета.

Відомо, що розподіл інтенсивності світла на інтерферограмі несучих смуг записується у вигляді:

$$I_0(x, y) = A_0(x, y) + B_0(x, y)\cos[\omega_x(x, y) + \varphi_0(x, y)], \quad (3)$$

де x, y – координати точки поверхні досліджуваного об'єкта, $A_0(x, y)$ – фонове освітлення, $B_0(x, y)$ – видність смуг, $\varphi_0(x, y)$ – початкове значення фази несучих смуг, $\omega_x(x, y)$ – просторова частота несучих смуг уздовж y -напрямку.

Після нагрівання об'єкта розподіл інтенсивності на інтерферограмі (з урахуванням модуляції несучими смугами) має такий вигляд:

$$I_m(x, y) = A_m(x, y) + B_m(x, y)\cos[\omega_x(x, y) + \varphi_0(x, y) + \Delta\varphi(x, y)], \quad (4)$$

де $\Delta\varphi(x, y)$ – розподіл фази по деформованій поверхні об'єкта, який і потрібно визначити.

Застосовуючи до рівнянь (3) та (4) перетворення Фур'є, отримуємо спектр $F_d(x, i\omega)$ розподілу інтенсивності інтерферограми вздовж перетину об'єкта. Оскільки $\Delta\varphi(x, y)$, $A_m(x, y)$ і $B_m(x, y)$ змінюються повільно у порівнянні з несучою частотою $\omega_0(x, y)$, функція $F_d(x, i\omega)$ буде мати виражений пік на частоті ω_0 . Обнуливши значення усіх просторових частот спектрів за межами ω_0 , отримуємо односторонній спектр. Односторонній спектр – спектр аналітичної функції $\varphi(y)$, яка є функцією комплексної змінної z , що утворюється, коли до дійсної функції $I_x(y)$ додати як уявну частину її перетворення Гілберта:

$$\gamma(y) = I_x(y) + i \cdot I_x(y)^{\sim},$$

де $I_x(y)^{\sim} = \frac{1}{\pi} \int \frac{I_x(s)}{y-s} ds$ – перетворення Гілберта.

Аналітична функція $\varphi(y)$ дозволяє визначити фазу несучих смуг як \arctg відношення уявної частини аналітичної функції $\varphi(y)$ до дійсної:

$$\varphi_x(y) = \arctg(\text{Im}[\gamma(y)]/\text{Re}[\gamma(y)]). \quad (5)$$

Аналітичну функцію $\gamma(y)$ знаходимо, застосовуючи обернене перетворення Фур'є до модифікованого спектра $F_d(x, i\omega)$, потім визначаємо моментальну фазу $\varphi_x(y)$ несучих смуг для вибраного стовпчика x зображення інтерферограми. Отриманий розподіл фаз $\varphi_x(y)$ визначений із точністю 2π , що пов'язано з періодичністю функції \arctg і характеризується стрибками значення фаз від $-\pi$ до $+\pi$. Програма обробки даних автоматично визначає та ліквідує стрибки фази вздовж стовпчика і між стовпчиками зображення інтерферограми. Послідовно перебираючи таким чином усі стовпчики зображення інтерферограми, отримуємо фазовий портрет об'єкта.

Маючи фазові портрети об'єкта у початковому недеформованому стані та у деформованому стані (рис. 3), знаходимо їх різницю і отримуємо різницевий фазовий портрет, який і характеризує деформацію об'єкта.

Таким чином, застосовуючи пряме перетворення Фур'є до спектр-інтерферограм об'єкта, модифікуючи спектр інтерферограми, перетворюючи його в односторонній, застосовуючи до нього обернене перетворення Фур'є, отримуємо аналітичну функцію розподілу інтенсивності в інтерферограмі. Ця функція дозволяє побудувати фазовий портрет тангенціальних переміщень поверхні об'єкта, який дає змогу створити карту розподілу поверхневих напруг об'єкта.

Кількісне значення векторів переміщення точок Δr поверхні досліджуваного об'єкта може бути знайдене з розподілення фази $\Delta\varphi(x, y)$ і параметрів оптичної схеми:

$$\Delta\varphi(x, y) = 2\pi/\lambda * \Delta r(r_0 - r) \quad (6)$$

де Δr – вектор переміщення точок об'єкта між експозиціями, r_0 – хвильовий вектор освітлюючої хвилі у точці, r – орт вектор напрямку спостереження точки, λ – довжина хвилі джерела ко-

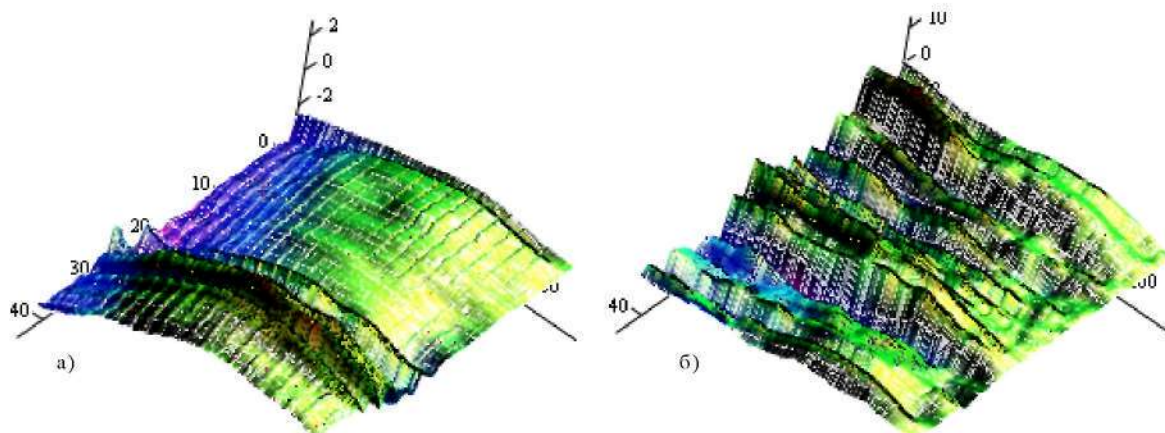


Рис. 3. Діаграма фазової поверхні а) недеформованого стану, б) деформованого стану

герентного випромінення, ДФ - сумарний зсув фаз хвиль.

Отримані результати засвідчують, що в досліджуваному об'єкті існують внутрішні напруження, розподілені переважно вздовж осі з максимальною фазовою амплітудою 10 рад (± 1 рад, що відповідає деформації поверхні порядку 0,1 мкм).

Висновки

Метод спекл-інтерферометрії з використанням несучих смуг дає змогу реєструвати стан

поверхні об'єкта, візуалізувати локалізацію внутрішніх напружень та оцінити величину зміщень. Отримані результати дозволяють зробити висновок, що об'єкт, фазовий портрет якого має більші стандартне відхилення і ранг, є дефектним і має менший робочий ресурс. У поєднанні з цифровими засобами реєстрації та комп'ютерною обробкою спекл-інтерферограм метод спекл-інтерферометрії відповідає сучасним методам неруйнуючого контролю якості у режимі реального часу.

1. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. – М.: Мир, 1982. – 504 с.
2. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия / Пер. с англ. под ред. Г. В. Скромного. – М.: Мир, 1986. – 328 с.
3. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. – М.: Мир, 1973. – 686 с.
4. Лобанов Л. М., Пивторак В. А., Савицкий В. В., Олейник Е. М. Автоматический компьютерный анализ голографических интерферограмм при неразрушающем контроле качества материалов и элементов конструкций // Автоматическая сварка. – 2002. – № 10. – С. 8–14.
5. Островский Ю. И., Бутусов М. М., Островская Г. В. Голографическая интерферометрия. – М.: Наука, 1978. – 336 с.
6. Рябухо В. П. Спекл-интерферометрия // Соровский образовательный журнал. – 2001. – Т. 7, № 5. – С. 102–109.
7. Смоляк В. И., Тхоруж А. Л., Олейник О. Т. Использование методов спекл-интерферометрии для изучения продольных смещений поверхностей металлических балочных образцов // Оптический журнал. – 2004. – Т. 71, № 7. – С. 58–61.
8. Улянов С. С. Что такое спеклы // Соровский образовательный журнал. – 1999. – № 5. – С. 112–116.
9. Франсон М. Оптика спеклов / Пер. с англ. под ред. Ю. И. Островского. – М.: Наука, 1980. – 171 с.

T. Komarevska

ON THE METHOD OF SPECL INTERFEROMETRY WITH BUILDING A PHASE PORTRAIT IN EXAMINATION OF DIFFUSED SAMPLES

The article analyses the method of specl interferometry with using carrier-frequency bands and building a phase portrait. The method makes possible to register surface condition, visualize a localization of locked-in stress and estimate a value of deformation offset. In addition digital recording and processing are used. It allows to accomplish the actual-time non-destructive and non-contacting examination of surface. As a result criteria of surface condition are obtained. The criteria are the standard deviation and a rank. It helps to estimate the presence of defects and endurance.