

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ТА ОБРОБЛЕННЯ ІНТЕРФЕРОГРАМ ПОВЕРХНІ ЗА СХЕМОЮ ТВАЙМАНА–ГРІНА У НЕРУЙНІВНОМУ КОНТРОЛІ

З. Т. Назарчук, Т. І. Вороняк, І. В. Стасишин

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

E-mail: voroniak.taras@hotmail.com

Для забезпечення максимальної точності відтворення рельєфів та деформаційних полів переміщень поверхні елементів конструкцій використано інтерферометри за схемою Тваймана–Гріна та оригінальні алгоритми оброблення інтерферограм поверхні. Максимальної точності оброблення експериментальних результатів досягнуто з допомогою конструкційних доповнень до оптичної схеми та підбором її елементів під час налаштування інтерферометра, а також нових алгоритмів відбору та реєстрування серії інтерферограм, спекл-інтерферограм і спекл-зображень поверхні. Наведено інтерферограми поверхні металів за дії статичних і втомних циклічних навантажень, спекл-інтерферограми поверхні металів та полімерних композитів за дії статичних та динамічних навантажень. Результати їх оброблення та розшифрування підтверджують ефективність саме інтерферометра Тваймана–Гріна для розв'язування задач механіки руйнування та деформівного твердого тіла. Зокрема, оцінювання шорсткості та хвилястості поверхні металів; розміру пластичної зони в околі концентратора напружень; деформації поля переміщень металів і композитів, а також виявлення в них прихованих дефектів тощо.

Ключові слова: *інтерферограма, рельєф поверхні, деформаційне поле переміщень поверхні, електронна спекл-інтерферометрія, прихований дефект.*

PECULIARITIES OF FORMATION AND PROCESSING OF SURFACE INTERFEROGRAMS ACCORDING TO TWYMAN–GREEN SCHEME IN NON-DESTRUCTIVE TESTING

Z. T. Nazarchuk, T. I. Voronyak, I. V. Stasyshyn

H. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv

The goal of the work is to ensure the maximum accuracy of reconstruction of relief and deformation displacement fields of structural element surface by the interferometric method. The authors successfully use novel algorithms for the processing of surface interferograms as well as the interferometers that follow the Twyman–Green scheme in order to implement such optical testing of the surface. The maximum precision of obtained experimental data was achieved by the use of structural additions to the optical circuit and the selection of optical elements and their settings during adjustment of the interferometer, as well as new algorithms for the selection and registration of a series of interferograms, speckle interferograms and speckle surface images. The authors proposed structural additions to the interferometer scheme used in the testing of both smooth and rough surfaces, appropriate methods for calculating the parameters of optical elements and their adjustments. Examples of obtained interferograms of the surface of metals under the static and fatigue cyclic loading, speckle interferograms of the surface of metals and polymer composites under the static and dynamic loading are given. The results of processing and interpreting these interferograms confirm that the Twyman–Green interferometer is an effective instrument for solving the problems of fracture mechanics and deformable solids. In particular, an assessment was made of: roughness and waviness of the surface of metals; sizes of the plastic zone around the stress concentrator; deformation displacement fields of metals and composites, as well as the detection of hidden defects in them.

Keywords: *interferogram, surface relief, deformation displacement fields of surface, electronic speckle interferometry, hidden defect.*

Вступ. Для забезпечення максимального контрасту інтерферограм поверхонь, тобто мінімальної похибки контролю як гладких, так і шорстких, запропоновано оригінальну методику налаштування інтерферометра Тваймана–Гріна (ІТГ), конст-

© З. Т. Назарчук, Т. І. Вороняк, І. В. Стасишин, 2024

рукційні доповнення до його оптичної схеми та рекомендації щодо вибору і розрахунку параметрів оптичних елементів.

Нагадаємо, що цей тип інтерферометра, запропонований і запатентований ще у 1916 році, відрізняється від подібного та найпопулярнішого інтерферометра Альберта Майкельсона [1]. Зокрема, для його роботи сформовано розширений паралельний промінь когерентного світла, розмір якого задає розмір ділянки спостереження (частину поверхні контрольованого об'єкта, яку одночасно досліджують), а також використано об'єктив, що формує два зображення – предметне (цієї ж ділянки) та опорне (поверхні опорного дзеркала-еталона) (див. рис. 1). Ці два зображення накладаються та внаслідок когерентної взаємодії утворюють інтерференційну картину, яку називають інтерферограмою поверхні (ІП). Розшифрування ІП дає змогу досліджувати площинність та відтворювати рельєф різноманітних гладких предметів [2, 3].

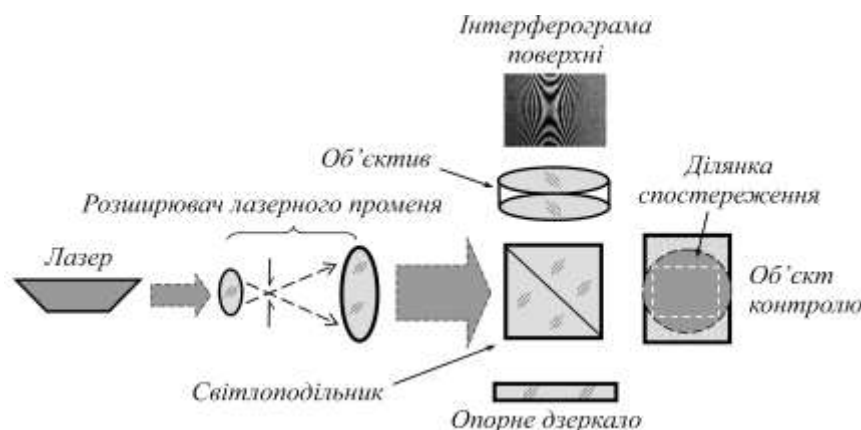


Рис. 1. Загальна оптична схема інтерферометра Тваймана–Гріна.

Перевага ІПГ проти інших подібних приладів – мінімальна кількість елементів оптичної схеми, тобто її простота та дешевизна, а також порівняно велика ділянка спостереження – до кількох см² під час контролю гладких поверхонь та до одного м² за моніторингу шорстких. Це дає змогу розв'язувати низку задач механіки руйнування (визначати розміри втомної зони передруйнування, прогнозувати місце старту та напрямку поширення тріщини тощо), а також механіки деформівного твердого тіла (визначати деформаційні поля переміщень поверхні, коефіцієнт Пуасона, виявляти приховані дефекти та залишкові напруження) [4].

Ще одна перевага ІПГ для дослідження шорстких поверхонь – висока чутливість лише до переміщень уздовж нормалі (осі Z), яку визначають доволі точно і яка залежить лише від довжини хвилі використовуваного когерентного джерела світла (лазера), що суттєво спрощує розшифрування ІП.

Отже, оскільки ділянка спостереження освітлюється і фотореєструється вздовж своєї нормалі, ІПГ за незначних коректувань здатний контролювати як шорсткі, так і гладкі поверхні, при цьому похибка контролю не перевищує кількох нм для обох випадків. Саме налаштуванням оптичної схеми вдасться забезпечити таку високу точність. І першою її складовою є контраст інтерференційної картини.

Контраст інтерферограм поверхні. Якість зображень, зокрема ІП, залежить у першу чергу від їх контрасту K . Для його оцінки використовують вираз $K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$, де I_{\max} і I_{\min} – відповідно, максимальні та мінімальні значення розподілу інтенсивності світлового поля площею зображення. Поточковий розподіл інтенсивності I_i на ІП поверхні описує вираз [5, 6]

$$I_i = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\varphi_z), \quad (1)$$

де I_1 та I_2 – інтенсивності предметного та опорного променів, відповідно; $\Delta\varphi_z$ – різниця фаз між ними (див. рис. 2). В ІТГ максимальна $I_{i\max}$ відповідає $H = 0$; $\frac{\lambda}{2} \dots n \frac{\lambda}{2}$, а мінімальна $I_{i\min}$ – $H = \frac{\lambda}{4}$; $\frac{3\lambda}{4} \dots \left(\frac{\lambda}{4} + n \frac{\lambda}{2}\right)$, де H – висота рельєфу гладкої поверхні; λ – довжина хвилі використаного когерентного джерела світла; n – ціле число (див. рис. 2).

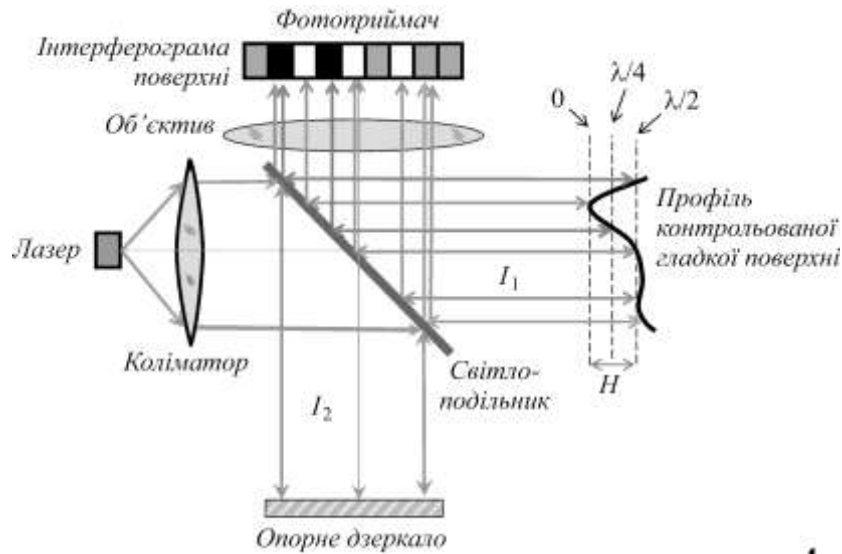


Рис. 2. Схема проходження променів в інтерферометрі.

Контраст інтерференційних картин, який ще називають видністю інтерференційних смуг V , залежить від співвідношення інтенсивностей предметного I_1

та опорного I_2 променів (див. рис. 2): $V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2}$ [6]. При цьому

припустимо, що виконуються всі умови для спостереження інтерференційної картини: постійна інтенсивність I_1 та I_2 ; сталі їх частота ν чи довжина хвилі λ (одномоновий лазер); поточкова незмінна різниця фаз між предметним та опорним променями; однакова їх поляризація. Максимального контрасту $K = 1$ досягають, якщо $I_1 = I_2$ (ідеальний випадок). Коли ж $I_1 = nI_2$, то $K = \frac{2\sqrt{n}}{1+n}$.

Для контролю предметного та опорного зображень, а також ІТГ під час налаштування ІТГ в його оптичну схему вводили два оптичні затвори. Один розташовували між світлоподільником та об'єктом контролю, інший – між світлоподільником та опорним дзеркалом (див. рис. 3). Реєстрували зображення та ІТГ цифровою фотокамерою, роботою якої, як і затворів, керував комп'ютер. Такі доповнення дали змогу окремо реєструвати предметне та опорне зображення, аналізувати їх, порівнювати і налаштовувати, щоб поліпшити якість та вирівняти інтенсивність. Також реєстрували окремо оптичні шуми світлоподільника та розширювача лазерного променя для їх компенсації під час розшифрування ІТГ.

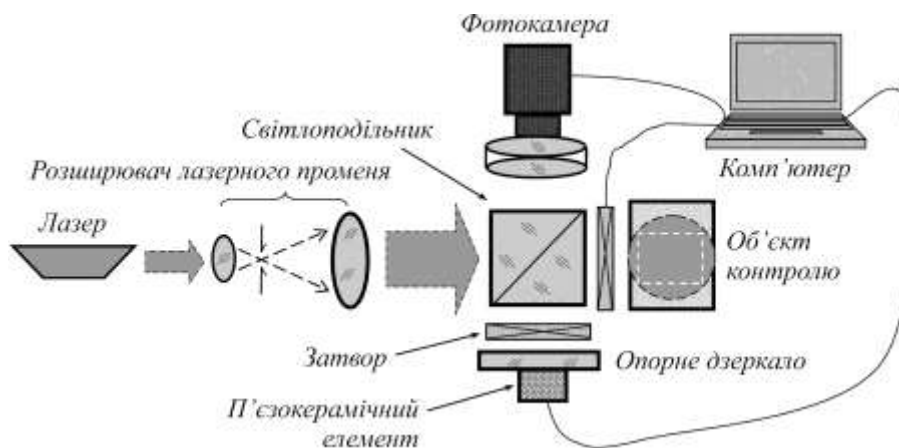


Рис. 3. Загальна схема експериментальної установки.

Як світлоподільник використовували призму-куб (див. рис. 1 та 3), що складалася з двох трикутних призм та металевого напівпрозорого покриття, яке розділяло розширений промінь на два однакової інтенсивності (50:50), не змінюючи їх поляризації, що важливо для високого контрасту ПП.

Щоб одержати серію ПП, які відрізняються лише зсувом фаз опорного променя, опорне дзеркало кріпили до п'єзокерамічного елемента, який пересував його відповідно до інтенсивності прикладеного електричного сигналу (див. рис. 3). За такого доповнення до схеми ІТГ вдалося за серією цих ПП відтворити рельєфи та поля переміщень ділянки спостереження та оцінити їх кількісно [2–4]. Зауважимо, що під час зсуву фази одного з променів контраст ПП не змінюється.

Під час налаштування ІТГ для контролю гладких поверхонь вирівнювати інтенсивності I_1 та I_2 доволі легко, адже стандартні оптичні “глухі” дзеркала та полірована поверхня металів мають близький та високий коефіцієнт відбивання (>90%), тому найчастіше контраст таких ПП становить $0,9 < K < 1$. Для контролю шорстких поверхонь підібрати опорне дзеркало, щоб $I_1 \approx I_2$, складно (практично неможливо). Тоді замість нього рекомендують використовувати зразок, поверхня якого має такі ж чи близькі відбивально-розсіювальні характеристики, як і контрольована, тобто зразок з такою ж шорсткою поверхнею [7].

Вибір об'єктива фотокамери. Тут для реєстрування ПП в першу чергу необхідно звертати увагу на такі характеристики:

- 1) розмір кадру зображення;
- 2) роздільну здатність;
- 3) світлосилу та діапазон зміни діафрагмового числа.

Адже розмір кадру має бути не меншим, ніж матричного приймача фотокамери. На роздільній здатності заострюють увагу, контролюючи параметри шорсткості гладкої поверхні. Якщо, наприклад, на базовій довжині 80 мкм (проміжку, де оцінюють висоту та глибину нерівностей поверхні) необхідно виконати 10 вимірювань, то роздільна здатність вибраного об'єктива має перевищувати 120 лін./мм. Проте під час дослідження просторових полів переміщень шорстких поверхонь така висока роздільна здатність недоречна, але бажана максимальна глибина різкості як у предметній площині, так і у площині зображення [8]. Її регулюють, змінюючи діафрагмове число (величину діафрагми), і розраховують відповідно до дистанції знімання та фокусу об'єктива [9]. Таким чином, оптимальними для ІТГ можуть бути штатні об'єктиви сучасних цифрових фотокамер, обладнані ірисовою діафрагмою, зі шкалою діафрагмових чисел 2,0...22 та фокусною віддаллю 20...100 мм. Мікрооб'єктиви металографічних чи біологічних мікроско-

пів характеризуються високою роздільною здатністю (>120 лін./мм), порівняно з малим полем зору ($\sim 100 \times 100$ мкм²), та відсутністю змінної діафрагми. Вони придатні лише для оцінювання параметрів шорсткості гладкої поверхні (як, наприклад, мікроінтерферометр Лінніка МІІІ-4) [5].

Формування спекл-інтерферограм. Якщо інтерферограма гладких поверхонь смугаста (див. рис. 1), то шорстких – зерниста (набір цяток або спеклів) (див. рис. 4а), тому дістала назву “спекл-інтерферограма” (СІ). Вона не несе жодної інформації про рельєф поверхні, проте дає змогу контролювати його зміни чи поле деформацій з похибкою у кілька нанометрів. Для оцінювання таких змін необхідно реєструвати щонайменше дві СІ: першу СІ₁ – до навантажень, другу СІ₂ – після. А далі розшифрувати різницеву картину, або різницеву СІ (РСІ), тобто $РСІ = |СІ_2 - СІ_1|$. До того ж РСІ також має смугасту структуру (див. рис. 4б).

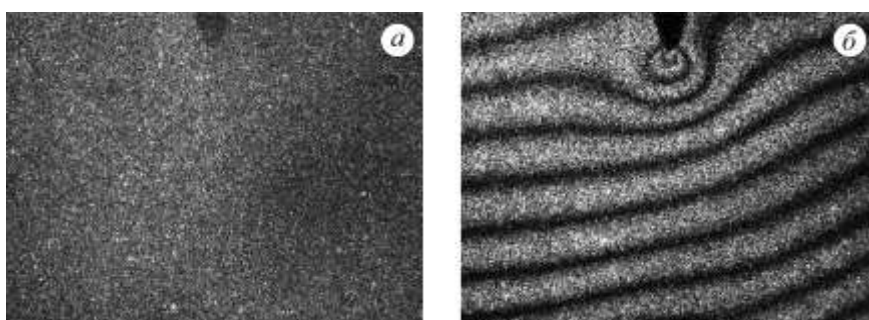


Рис. 4. СІ (а) та РСІ (б) сталевій балці з концентратором напружень (вирізом) за чотириточкового згину. Розмір ділянки контролю 20×30 мм².

Попіксельний розподіл інтенсивності I_{i1} в СІ₁ описує також вираз (1). Для СІ₂ він набуває вигляду

$$I_{i2} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\varphi_z + \alpha), \quad (2)$$

де α – додаткова різниця фаз між променями внаслідок переміщення шорсткої поверхні. Зв'язок між α та переміщенням поверхні ΔH_z описує вираз [10]

$$\alpha = \frac{2\pi\Delta H_z(1 + \cos\theta_z)}{\lambda}, \quad (3)$$

де θ_z – кут падіння лазерного (предметного) променя на контрольовану поверхню. Різницю $I_{i2} - I_{i1}$ визначають за виразами (1) та (2), а далі – параметр α і згідно з (3) – ΔH_z . Картина на РСІ складається зі смуг (див. рис. 4б), кожна з яких відповідає однаковому переміщенню поверхні вздовж нормалі:

$$\Delta H_z^1 = \frac{\lambda}{1 + \cos\theta_z}.$$

Оскільки в ІТГ лазерний промінь падає на поверхню вздовж нормалі, тобто $\theta_z = 0$ (найвища чутливість інтерферометра до переміщень поверхні), то проміжок між сусідніми смугами (темними чи світлими) на РСІ відповідає переміщенню поверхні

$$\Delta H_z^1 = \frac{\lambda}{2}.$$

Розбивши цей проміжок, наприклад, на 200 частин (градацій сірого), отримують поле переміщень поверхні з похибкою одиниць нанометрів (за використання найпоширенішого *He-Ne* лазера з $\lambda = 632,8$ нм) [2, 5, 6, 10].

Але нема гарантії, що $\theta_z = 0$ для всієї ділянки контролю, або що відхилення від нормалі настільки незначне, що його можна знехтувати. Для цього під час налаштування ІТГ вмикали оптичний затвор між світлоподільником та опорним дзеркалом і реєстрували зображення лише поверхні об'єкта контролю та досягали максимального його контрасту. При цьому стежили, щоб контраст був однако-вим по всьому зображенні. Таку ж процедуру виконували і для зображення опорного дзеркала за вмикання лише другого оптичного затвора між світлоподільником та предметом. Так не тільки забезпечували умову $\theta_z \approx 0$, але й автоматично вирівнювали оптичні шляхи предметного та опорного променів, що також гарантує максимальний контраст ІТГ.

Для контролю гладких поверхонь, тобто для отримання ІТГ з найвищим контрастом, такого налаштування оптичної схеми ІТГ цілком достатньо. Проте під час контролю шорстких, тобто реєстрування СІ, необхідно додатково регулювати об'єктив фотокамери, виставляючи необхідне діафрагмове число, щоб збільшити розміри спеклів. Адже налаштовують оптичну схему ІТГ за максимальної діафрагми (мінімального діафрагмового числа), коли об'єктив володіє найвищою роздільною здатністю (найменшим розміром спекла), світлосилою та контрастом зображення. За допомогою СІ контролюють лише зміни рельєфу чи поля деформацій, а деформації тривимірні, тому спекли під час навантаження об'єкта контролю зміщуються разом з поверхнею [11]. При цьому РСІ спостерігатиметься лише до моменту, коли початковий та зміщений спекли на СІ перекриватимуться. Таким чином, від розміру спекла залежить діапазон контролю змін поверхні: що ширший розмір спекла, то ширший діапазон контролю. Регулювати розмір спекла можна, змінюючи діафрагму об'єктива фотокамери. У дослідженнях задавали розмір (діаметр) спекла $S_{speckle}$, використовуючи вирази для розрахунку роздільної здатності та глибини різкості об'єктива фотокамери [8, 9]. Також зручно для цього користуватись й виразом, запропонованому у працях J. W. Goodman чи R. S. Sirohi:

$$S_{speckle} = 2,44 \cdot \lambda(1 + M) \cdot \frac{f}{D}, \quad (4)$$

де λ – довжина хвилі лазера; M – масштабний коефіцієнт (коефіцієнт лінійного оптичного збільшення об'єктива); f – фокусна віддаль об'єктива; D – розмір (діаметр) його діафрагми [12, 13]. Відношення f/D називають діафрагмовими числами, ряд яких нанесено на оправі кожного фотографічного чи проєкційного об'єктива. Таким чином, доволі просто під час експериментів задавати розмір спекла, обчислюючи заздалегідь за виразом (4) необхідне діафрагмове число.

Результати експериментів. На рис. 5 подано зображення та відповідні їм ІТГ сталевого зразка (сталь 08кп) з концентратором напружень (круглим отвором) у різні моменти його пошкодження за дії циклічних навантажень, які отримані за допомогою ІТГ. Вони свідчать, що розмір ділянки спостереження ІТГ достатній, щоб досліджувати втомне руйнування металів. Адже можна оцінювати всю статичну пластичну зону як в околі концентратора напружень (рис. 5*г*), так і біля вершини тріщини (рис. 5*д*), а також контролювати її зародження та поширення.

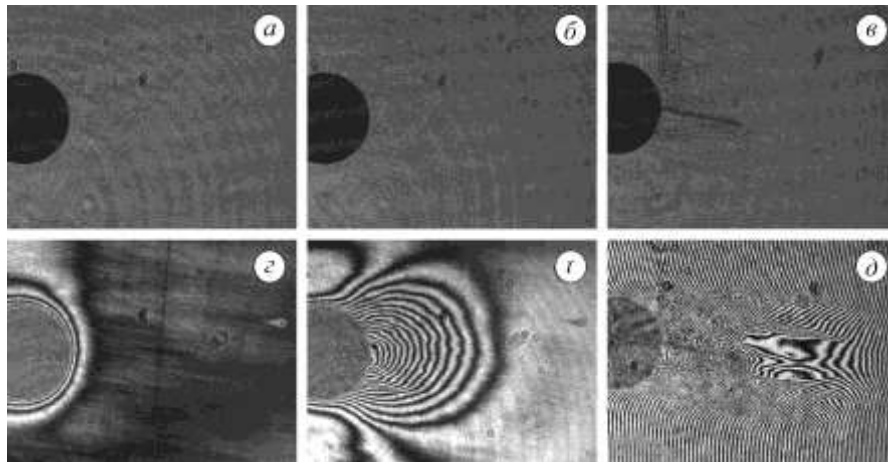


Рис. 5. Зображення та відповідні їм ІП сталевго зразка в різні моменти його пошкодження за дії втомних навантажень: *a, c* – до навантаження; *b, d* – за появи пластичної зони; *e, d* – за поширення тріщини. Розмір ділянки контролю $6 \times 9 \text{ мм}^2$.

На рис. 6 зображено ділянку спостереження дюралевого зразка, ІП та результати її оброблення фазозсувними алгоритмами. Зразок також мав концентратор напружень у вигляді круглого отвору та піддавався циклічним навантаженням. Проте на ньому пластична зона проявилася зміною шорсткості поверхні (див. рис. 6б) в околі отвору, на відміну від сталевго зразка, де вона проявилася зміною його товщини в околі отвору біля вершини тріщини (див. рис. 5*e* і *d*, набір кільцеподібних смуг різного діаметра) [14]. З відтвореного мікрорельєфу отримують його профіль уздовж довільного напрямку, як це вимагають нормативні документи про контроль шорсткості поверхні [15].

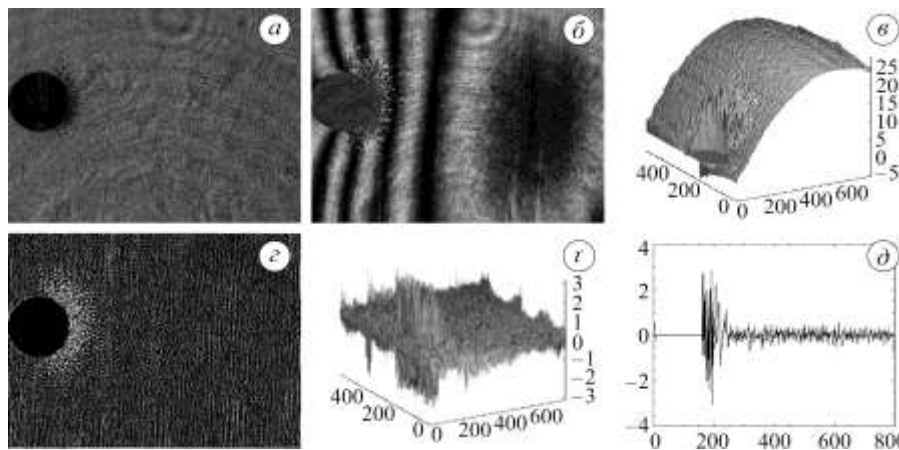


Рис. 6. Зображення ділянки спостереження (*a*) та відповідна ІП (*b*) дюралевого зразка за дії втомних навантажень та результати її оброблення фазозсувними алгоритмами: *e* – відтворений повний рельєф поверхні; *c* – карта мікрорельєфу; *d* – відтворений мікрорельєф поверхні; *f* – його профіль уздовж горизонталі: по осі абсцис – номер пікселя, по осі ординат – висота рельєфу у відносних одиницях. Розмір ділянки контролю $6 \times 9 \text{ мм}^2$.

Експериментальну установку на базі ІТГ також успішно застосовували під час динамічного навантаження об'єктів контролю, зокрема, теплового та акустичного. Теплові навантаження використовували для пошуку прихованих дефектів у металах та шаруватих полімерних композитах, а акустичні – лише для композитів. При цьому розмір ділянок спостереження становив від кількох до сотень см^2 . На рис. 7 зображені РСІ, отримані за теплового навантаження. Зокрема, дефект

зварного шва (виділений штриховою рамкою на рис. 7а) та місце тріщини всередині шаруватого композиту (рис. 7б). Під час теплового навантаження вдавалося доволі ефективно виявляти приховані дефекти методом електронної спекл-інтерферометрії, проте через інертність теплових процесів такий контроль значно повільніший, ніж за акустичного і навіть механічного навантажень.

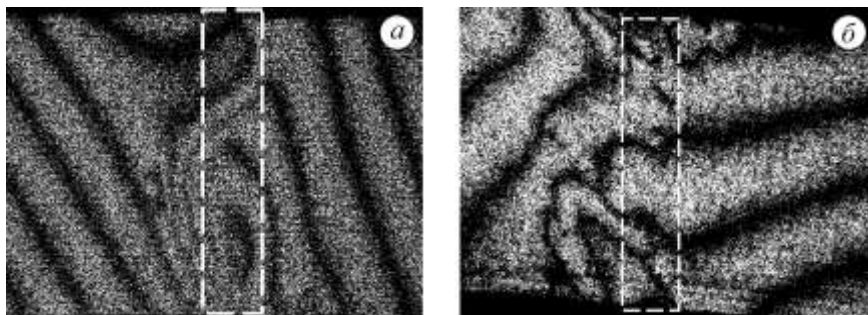


Рис. 7. РСІ за теплового навантаження. Розмір ділянки контролю $20 \times 30 \text{ мм}^2$.

За акустичного навантаження можна не тільки оперативно виявляти приховані технологічні (непроклеї) та експлуатаційні (тріщини, відшарування, зминання) дефекти, але й значно точніше визначати їх форму та розміри. Для цього необхідно додатково проаналізувати модову структуру коливань поверхні над дефектом під час такого збудження та контролювати частоту акустичної хвилі [16]. Крім того, швидкість пошуку та виявлення дефектів зростає на порядок, а отже, зменшуються й енергетичні затрати відповідного обладнання.

ІТГ із запропонованими конструкційними доповненнями можна реєструвати спекл-зображення поверхні [16, 17]. Для цього випадку перекривали оптичний затвор між світлоподільником та опорним дзеркалом (див. рис. 3). За потреби можна значно збільшувати розміри ділянки контролю до кількох до сотень см^2 та освітлювати її розбіжним лазерним пучком. Розбіжність регулюють, переміщуючи коліматор уздовж оптичної осі ІТГ (див. рис. 2). Така схема реєстрування спекл-зображень дає можливість контролювати поверхні довільної шорсткості: від оптично гладких (14...12 класи згідно з [18]) до нешлифованих.

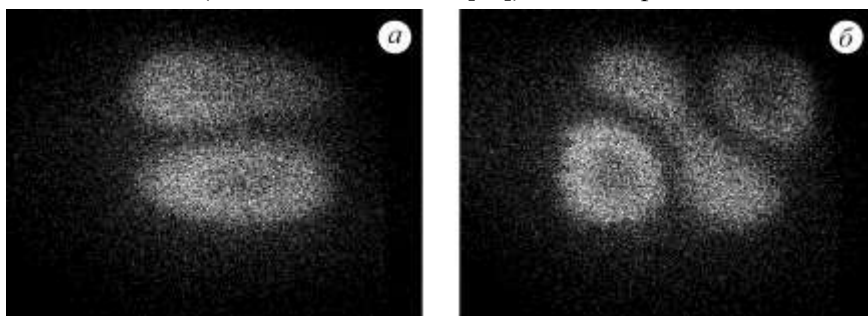


Рис. 8. РСІ прихованих дефектів прямокутних розмірів у шаруватому композиті за акустичного навантаження. Розмір ділянки контролю $40 \times 60 \text{ мм}^2$.

ВИСНОВКИ

Максимальну точність відтворення рельєфів та деформаційних полів переміщень поверхні елементів конструкцій забезпечено інтерферометрами за схемою Тваймана–Гріна. Обґрунтовано конструкційні доповнення до них для контролю як гладких, так і шорстких поверхонь, відповідні методики розрахунку параметрів оптичних елементів та їх налаштування. Наведено приклади інтерферограм поверхні металів за дії статичних і втомних циклічних навантажень, спекл-інтерферограми поверхні металів та полімерних композитів за дії статичних і ди-

намічних навантажень. Результати оброблення та розшифрування таких інтерферограм підтверджують ефективність саме інтерферометра Тваймана–Гріна для розв’язання задач механіки руйнування та деформівного твердого тіла. Зокрема, оцінено шорсткість та хвилястість поверхні металів; розмір пластичної зони в околі концентратора напружень; деформаційні поля переміщень металів і композитів, а також виявлено в них приховані дефекти тощо.

1. Michelson, A.; Morley, E. On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether. *American Journal of Science*. **1887**, 34(203), 333–345. <https://doi.org/10.2475/ajs.s3-34.203.333>
2. Voronyak, T.I.; Kmet, A.B.; Muravsky, L.I.; Nazarchuk, Z.T.; Stasyshyn, I.V. Algorithm of surface relief retrieval at arbitrary phase shift between interferograms. *Information Extraction and Processing*. **2020**, 48(124), 43–60. <https://doi.org/10.15407/vidbir2020.48.043>
3. Muravsky, L.I.; Ostash, O.P.; Kmet', A.B.; Voronyak, T.I.; Andreiko, I.M. Two-frame phase-shifting interferometry for retrieval of smooth surface and its displacement. *Opt. Lasers Eng.* **2011**, 49, 305–312. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2010.11.021>
4. Muravsky, L.; Kmet', A.; Voronyak, T. Two approaches to the blind phase shift extraction for two-step electronic speckle pattern interferometry. *Opt. Eng.* **2013**, 2(10), 101909. <https://doi.org/10.1117/1.OE.52.10.101909>
5. Malacara, D.; Servín, M.; Malacara, Z. Interferogram Analysis for Optical Testing. *Boca Raton, FL: Taylor & Francis*. **2005**, 568. <https://doi.org/10.1201/9781420027273>
6. Sirohi, S.R. Optical Methods of Measurement: Wholefield Techniques, 2nd ed. *Boca Raton, FL: Taylor & Francis*, **2009**, 290. <https://doi.org/10.1201/9781420017762>
7. Voronyak, T.I.; Muravs'kyi, L.I.; Stasyshyn, I.V. Interferometric device for determining deformation displacement fields of rough surfaces. Patent of Ukraine for a utility model #135595. Bull. # 13, 10.07.2019. (in Ukrainian)
8. Voronyak, T.I.; Muravs'kyi, L.I. Calculation of parameters of the optical circuit for systems of remote measurement of spherical bodies dimensions. *Physical methods and means of control of environments, materials and products*. **2003**, 8, 145–150. (in Ukrainian)
9. Kononov, V.I.; Fedorovsky, A.D.; Dubinsky, G.P. Optical systems for image construction. *Tekhnika*, 1981. (in Russian)
10. Jones, R.; Wykes, C. Holographic and Speckle Interferometry. *Cambridge University Press.*, **1989**, 140–141. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511622465>
11. Voronyak, T.I.; Kmet', A.B.; Muravs'kyi, L.I. Determination of the 3D fields of displacements by the method of phase-shifting speckle interferometry. *Materials Science*. **2009**, 45(3), 372–377. <https://doi.org/10.1007/s11003-009-9201-8>
12. Goodman, J.W. Speckle Phenomena in Optics Theory and Applications. *SPIE Press: Bellingham, WA, USA*, **2020**. <https://doi.org/10.1117/3.2548484>
13. Sirohi, R.S. (Ed.) Speckle Metrology; Marcel Dekker: *New York, NY, USA*, 1993.
14. Lobanov, L. M.; Muravs'kyi, L. I.; Pivtorak, V. A.; Voronyak, T. I. Monitoring of the Stressed State of Structural Elements with the Use of Electromagnetic Waves of Optical Range, in: Z. T. Nazarchuk Ed., *Technical Diagnostics of Materials and Structures: A Handbook [in Ukrainian]*, Vol. 3, Prostir-M, 2017, ISBN 978-617-7501-37-3.
15. International standard ISO 21920-2:2021. Geometrical product specifications (GPS). *Surface texture: Profile – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters*.
16. Nazarchuk, Z.; Muravsky, L.; Kuryliak, D. Optical Metrology and Optoacoustics in Nondestructive Evaluation of Materials. *Springer Series in Optical Sciences*. Volume 242. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2023. – 401 p. ISSN 0342-4111. ISSN 1556-1534 (electronic). Springer Series in Optical Sciences ISBN 978-981-99-1225-4. ISBN 978-981-99-1226-1 (eBook).
17. Nazarchuk, Z.T.; Muravsky, L.I.; Kuts, O.G. Nondestructive Testing of Thin Composite Structures for Subsurface Defects Detection Using Dynamic Laser Speckles. *Research in Nondestructive Evaluation*. **2022**, 33(2), 78–97. <https://doi.org/10.1080/09349847.2022.2049407>
18. Surface roughness. Parameters and characteristics. GOST 2789-73, 1973 (in Russian).

Одержано 21.06.2024