

НОВИЙ МЕТОД ТА ЗАСОБИ ФАЗОЗСУВНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ ДЛЯ ВІДТВОРЕННЯ І КОНТРОЛЮ ЕВОЛЮЦІЇ ПОВЕРХОНЬ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Л.І. Муравський, Т.І. Вороняк, І.В. Стасишин

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.

E-mail: murav@ipm.lviv.ua

Розроблено швидкісний метод трикрокової фазозсувної інтерферометрії з довільними фазовими зсувами опорного променя, який має низку переваг порівняно з відомими подібними методами фазозсувної інтерферометрії і, в першу чергу, не вимагає прецизійного калібрування фазозсувного пристрою та додаткової реєстрації опорного і предметного променів у інтерферометрії, а також забезпечує плавний зсув фази опорного променя. На основі методу трикрокової фазозсувної інтерферометрії створено експериментальний макет 3D профілометра, на якому апробовано нові методики відтворення рельєфу поверхні, екстрагування 3D шорсткості та хвилястості, встановлення найбільш імовірного місця старту втомної макротріщини у зразках алюмінієвого сплаву Д16Т із вирізами за циклічних навантажень та моніторингу еволюції поверхні зразків сталі У8 після наводнювання. Зокрема показано, що макротріщина з найбільшою імовірністю стартує на границі втомної зони передруйнування із того місця, де відбувається найбільший приріст шорсткості поверхні під час втомних навантажень. Під час дослідження впливу водню на рельєф поверхні зразків сталі У8 встановлено, що після насичення воднем її поверхня зазнає деформацій та на ній з'являються блістери. Під час виходу водню з матеріалу деформаційні зміни поверхні продовжуються, найінтенсивніші впродовж перших двох годин після наводнювання і суттєво сповільнюються через два тижні, а блістери збільшуються в розмірах та змінюють форму. Бібліогр. 12, рис. 6.

Ключові слова: фазозсувна інтерферометрія, опорний промінь, шорсткість поверхні, втомна макротріщина, блістери

На сьогодні методи часової фазозсувної інтерферометрії (ФЗІ) вважаються одними із найбільш прецизійних і точних серед усіх інтерферометричних і голографічних технологій реконструкції тривимірних об'єктів. До часової ФЗІ відносять одно-, дво- і багатохвильову, а також інтерферометрію зі скануванням довжини хвилі [1, 2]. Однохвильова часова (ОЧ) ФЗІ характеризується найбільшою прецизійністю вимірювань і найбільшою аксіальною роздільною здатністю, що може досягати одиниць ангстрем [3]. Тому дистанційний контроль рельєфу (ДКР) наношорстких поверхонь матеріалів, мікроелектромеханічних систем і поверхонь оптичних елементів методами та засобами ОЧ ФЗІ [2] вважається перспективним напрямом досліджень. Однак попри високу аксіальну роздільну здатність та можливість одночасно реєструвати порівняно великі площі ділянок поверхні досліджуваних об'єктів, реєстрація часової послідовності інтерферограм вносить додаткові похибки в результати вимірювань через можливі їх часові зміни за рахунок вібрацій, теплових потоків, еволюції поверхні у часі тощо.

Конкурентними напрямами інтерферометрії наношорстких поверхонь є просторова (динамічна) ФЗІ та сканувальна інтерферометрія у білому світлі (СІБС). Основна перевага просторової ФЗІ над часовою і над СІБС полягає у можливості одночасної реєстрації трьох-чотирьох зсунутих за фазою інтерферограм поверхні, завдяки чому можна спостерігати швидкоплинні процеси

зміни поверхні та виключати просторові завади, викликані вібраціями та тепловими потоками під час реєстрації інтерферограм у часі [1]. Водночас нижча порівняно з ОЧ ФЗІ аксіальна і латеральна роздільна здатність та громіздкі оптичні схеми ускладнюють її застосування для прецизійних досліджень. СІБС найбільш поширена серед інтерферометричних технологій просторової (3D) профілометрії поверхні. Про це свідчить інтенсивний розвиток оптичного приладобудування у даному напрямку, який супроводжується створенням серійних 3D профілометрів такими відомими корпораціями і компаніями, як Polytec, ZYGO, Taylor Hobson, Bruker та ін. Однак попри суттєві переваги порівняно з методами когерентної ФЗІ, які полягають у можливості вимірювати рельєф поверхні у широкому діапазоні зміни параметрів шорсткості та у відсутності необхідності фазового розгортання відтворених фазових мап рельєфу поверхні (відсутня «проблема 2 π -невизначеності»), технології СІБС володіють недоліками, які ускладнюють їх застосування для відтворення та ДКР наношорстких поверхонь. До цих недоліків, на нашу думку, слід віднести такі:

- мала площа досліджуваної прямокутної або квадратної ділянки поверхні, що викликано можливістю сформулювати площину однакової оптичної різниці ходу для опорного і предметного променів мікроінтерферометра, яка не зазнає аберацій, лише у параксіальній області оптичної системи;

– необхідність програмного зшивання просканованих ділянок поверхні, що призводить до виникнення додаткових похибок у відтвореному рельєфі усїєї поверхні;

– низька повторюваність результатів вимірювань під час сканування нанощорстких поверхонь, що викликано як похибками аксіальних переміщень оптичної системи мікроінтерферометра відносно поверхні об'єкта дослідження або навпаки, так і нижчою реальною аксіальною роздільною здатністю методу порівняно із ОЧ ФЗІ (порядку 3 нм [3]).

Отже, методи ОЧ ФЗІ залишаються найбільш придатними для відтворення та ДКР нанощорсткої поверхні, якщо її рельєф не змінюється у часі і вона не зазнає вібрацій та інших динамічних впливів. Проте такі умови для об'єктів досліджень не завжди можна забезпечити. Тому важливою є проблема створення швидкісних методів ОЧ ФЗІ, які б дали змогу мінімізувати вплив зовнішнього середовища під час реєстрації інтерферограм. Цю проблему може частково розв'язати за допомогою розробленого методу трикрокової ФЗІ з довільними фазовими зсувами опорного променя (ДФЗОП) [4].

Метод трикрокової ФЗІ з довільним зсувом фази опорного променя. Метод розроблено з метою усунення процедури калібрування фазозсувного елемента у схемі двопроменевого інтерферометра, реєстрації інтерферограм за довільних кутів α фазового зсуву опорного променя, а також для пришвидшення процесу реєстрації інтерферограм, використовуючи для цього плавний зсув опорного променя [4]. На відміну від розробленого раніше двокрокового методу [2], він не вимагає реєстрації просторових розподілів інтенсивностей предметного і опорного променів. У методі трикрокової ФЗІ за допомогою трьох цифрових інтерферограм $I_1(i,j)$, $I_2(i,j)$ та $I_3(i,j)$, де i,j – номери пікселів у цифровому зображенні, визначають фазові зсуви між ними α_{21} і α_{31} , або α_{21} і α_{32} , після чого відтворюють згорнуту і розгорнуту фазові мапи (ФМ) $\varphi_{Rw}(i,j)$, $\varphi_R(i,j)$ рельєфу ділянки поверхні, а також виділяють окремо ФМ 3D шоркості $\varphi_r(i,j)$ і хвилястості $\varphi_w(i,j)$, використовуючи для цього оптимальні частоти зрізів просторово-частотного спектра відтвореного рельєфу. Якщо для формування та реєстрації інтерферограм поверхні використовують оптичні схеми інтерферометрів з нормальним падінням предметного променя на об'єкт дослідження, то перетворення фазових мап у просторовий розподіл висот $h(i,j)$ рельєфу поверхні здійснюють за виразом $h(i,j) = \lambda\varphi(i,j)/4\pi$.

Спрощену блок-схему алгоритму реалізації методу наведено на рис. 1.

Розглянемо приклади використання методу для оцінювання втомної довговічності конструк-

ційних матеріалів та контролю еволюції поверхні матеріалу, що перебуває під дією агресивних середовищ.

Встановлення найбільш імовірного місця старту втомної макротріщини. Для оцінювання довговічності та залишкового ресурсу циклічно навантажуваних елементів конструкцій з круглими вирізами, отворами та іншими подібними концентраторами напружень визначають геометричні і структурні параметри втомної зони передруйнування (ВЗП) та циклічної і монотонної (статичної) пластичних зон в околі концентратора. Так, наприклад, розмір ВЗП d^* можна розглядати як критерій розмежування двох основних етапів втомного руйнування, а саме періоду зародження N_i і періоду субкритичного росту N_p мінімальної макротріщини, який використовують для оцінювання втомної довговічності N_f конструкційних матеріалів з отворами за формулою [5]

$$N_f = N_i \Big|_{a_i=d^*} + \int_{d^*}^{a_c} \frac{da}{F[\Delta K]}, \quad (2)$$

де a_i – початкова довжина макротріщини; $a_i = d^*$ критерій переходу мікротріщини у макротріщину; $a_c = f(\Delta K_{fc})$; ΔK_{fc} – циклічна в'язкість руйнування; $F[\Delta K]$ – функція, що описує діаграму швидкостей росту макротріщин; ΔK – розмах коефіцієнта інтенсивності напружень. Отже, щоб оцінити втомну довговічність матеріалу або елемента конструкції з вирізом згідно концепції О.П. Остаха і В.В. Панасюка [5, 6], необхідно спочатку визначити параметр d^* .

Однією із перспективних і найбільш прецизійних вважають інтерферометричну методику визначення параметра d^* , засновану на використанні методу двокрокової ФЗІ з довільним зсувом фази опорного променя. Методика базується на експе-

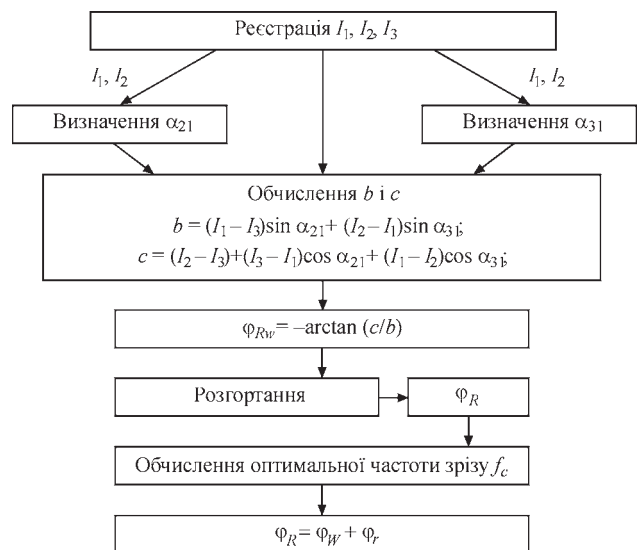


Рис. 1. Блок-схема алгоритму реалізації трикрокового методу ФЗІ

риментально доведеної гіпотезі про те, що максимальна шорсткість поверхні під час циклічних навантажень зразків з круглим вирізом, виготовлених зі сталі 08кп та алюмінієвого сплаву Д16Т, досягається на границі ВЗП [7]. Цю гіпотезу підтверджують також результати отримані Д. Аролюю і К. Вільямсом [8], М. Сураратчай та ін. [9] і К.С. Чаном та ін. [10], які свідчать про зростання локальної шорсткості поверхні металів і сплавів зі зростанням кількості циклів навантажень і, зокрема, про зростання ефективного коефіцієнта концентрації циклічних напружень K_f під час еволюції шорсткості поверхні [8]. З іншого боку, О.П. Осташ і В.В. Панасюк [5, 6] довели, що на границі ВЗП досягається максимум розмаху локальних напружень $\Delta\sigma_y^*$ [2, рис. 1.68], який пропорційний до K_f , якщо номінальне напруження $\Delta\sigma_{nom}$ є постійним. Отже, на границі ВЗП досягається максимальне значення K_f і, відповідно, досягаються максимальні значення параметрів шорсткості поверхні. Таким чином, розміри ВЗП можна віднайти, якщо обчислити середнє арифметичне значення висоти поверхні обмеженого масштабу S_a у кожній точці ділянки поверхні поблизу краю вирізу, тобто

$$S_a(x', y') = \frac{1}{L_x L_y} \int_{x' - \frac{L_x}{2}}^{x' + \frac{L_x}{2}} \int_{y' - \frac{L_y}{2}}^{y' + \frac{L_y}{2}} |h(x, y)| dx dy \quad (3)$$

де L_x і L_y – базові довжини базової площі $L_x \times L_y$ ($L_x = L_y$) вздовж осей x і y .

Результати вимірювання розмірів ВЗП для зразків, виготовлених зі сталі 08кп та алюмінієвого сплаву Д16Т, отримані у [7], збіглися із задовільною точністю з результатами вимірювань, отриманими за допомогою інших методів.

На основі методики визначення параметра d^* та методу трикрокової ФЗІ було розроблено нову методику визначення найбільш імовірного місця старту втомної макротріщини. В основу методики покладено згадану вище концепцію Осташа і Панасюка [5, 6], згідно з якою максимум розма-

ху локальних напружень $\Delta\sigma_y^*$ досягається на границі ВЗП. Оскільки просторовий розподіл $\Delta\sigma_y^*$ вздовж границі ВЗП неоднорідний, то логічно зробити припущення про те, що у місці максимального $\Delta\sigma_y^*$, тобто у місці максимального значення параметра шорсткості S_a , найбільша імовірність появи і старту втомної макротріщини. За критерієм виявлення місця і моменту старту макротріщини вибирали максимальний градієнт зростання шорсткості у будь-якому пікселі відтвореного рельєфу ділянки поверхні, розташованому на границі ВЗП. Завдяки такому критерію можна не лише визначити місце старту тріщини, але і передбачити найбільш імовірний момент її зародження під час прикладання циклічних навантажень на першому етапі втомного руйнування матеріалу, тобто передбачити кількість циклів N_i .

Експериментальну перевірку цієї методики здійснювали спочатку за допомогою двокрокового методу ФЗІ для компактного зразка зі сталі 08кп з круглим вирізом, аналізуючи розподіл параметра середнього арифметичного відхилення профілю R_a вздовж радіальних ліній, що починались від центра вирізу [2, сс. 98–100]. Результати експериментів показали, що шорсткість на межі ВЗП практично не зростає зі збільшенням кількості циклів крім того місця, де утворюється макротріщина. Саме у цьому місці помітне значне зростання шорсткості поверхні зі збільшенням кількості циклів до тих пір, доки там не утвориться макротріщина. За допомогою методу трикрокової ФЗІ дана методика була вдосконалена шляхом визначення параметра 3D шорсткості S_a , тобто середнього арифметичного значення висоти поверхні обмеженого масштабу на базовій площі $L_x \times L_y$, аналогічного параметру 2D шорсткості R_a вздовж профіля. Величину цього параметра у кожному пікселі відтвореного цифрового зображення рельєфу ділянки поверхні обчислювали за таким виразом [7]:

$$S_a(i', j') = \frac{1}{PQ\Delta_x\Delta_y} \sum_{(i'=i-p+\frac{P-1}{2})} \sum_{(j'=j-q+\frac{Q-1}{2})} |h(i, j)| \Delta_x \Delta_y, \quad (4)$$

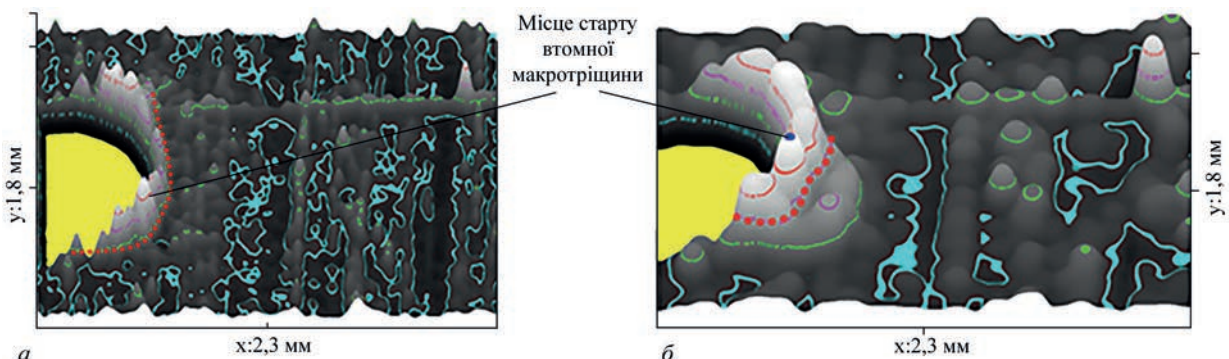


Рис. 2. Просторові розподіли середнього арифметичного значення висоти поверхні компактного зразка алюмінієвого сплаву Д16Т з круглим вирізом (діаметром 1,5 мм) на базовій площі $L_x \times L_y = 80 \times 80$ мкм після 1000 циклів (а) та після 5000 циклів (б)

де $p = 0, \dots, P-1$, $q = 0, \dots, Q-1$ – непарні номери пікселів на базовій площі $L_x \times L_y$; Δx , Δy – кроки між пікселами у двох ортогональних напрямках.

Для проведення досліджень використовували експериментальний макет 3D профілометра, побудований на базі інтерферометра Тваймана–Гріна, схема якого наведена на рис. 1.51 у праці [2]. Результати обчислення просторового розподілу S_a на ділянці відтвореного рельєфу поверхні зразка алюмінієвого сплаву Д16Т під час прикладання до нього циклічних навантажень за коефіцієнта асиметрії $R = P_{min}/P_{max} = 0,1$ та $\Delta\sigma_y(0) = 460$ МПа біля круглого отвору наведені на рис. 2.

Після $N_i = 8000$ циклів у досліджуваному зразку виникла втомна макротріщина якраз у тому місці на краю ВЗП (рис. 2), де спостерігали максимальний приріст шорсткості під час збільшення кількості циклів.

Дослідження впливу водню на рельєф поверхні зразків сталі У8. Для досліджень виготовляли пластиноподібні зразки ($50 \times 20 \times 2$ мм) зі сталі У8 (перлітна структура), поверхню яких шліфували і полірували до шорсткості $R_z = 0,060$ мкм, після чого відпалювали у вакуумі за температури $A_{c3} + 30$ °С. Зразки електролітично наводнювали за кімнатної температури в 1N розчині H_2SO_4 з домішкою 10 мг/л триоксиду арсену для інгібування реакції молізації водню на поверхні. Тривалість катодної поляризації становила 1 год, густина струму – $0,5 \dots 2,0$ А/дм², анодом слугувала платинова сітка. Для ДКР поверхні зразків використано метод трикрокової ФЗІ з ДФЗОП, який дає змогу відтворювати рельєф поверхонь з шорсткістю у межах 14–11 класів. Для досліджень використовували експериментальний макет 3D профілометра на базі інтерферометра Тваймана–Гріна [2, рис. 1.51]. За зареєстрованими інтерферограмами відтворювали рельєф поверхні на ділянці спостереження зразків до і після наводнювання. Рельєф ділянки спостереження відтворювали з розділенням 2,3 мкм.

Зі зростанням вмісту вуглецю змінюється структура металу за рахунок утворення карбідної фази, в якій водень практично нерозчинний, що знижує коефіцієнт його дифузії у 5 разів [11]. Водночас суттєво зростає площа міжзеренних та міжфазних границь перлітної структури, а також збільшується густина дислокацій для феритної структури [11]. Підвищена концентрація залишкового водню пов'язана із утворенням у структурі фериту макродефектів у вигляді блістерів, де водень накопичується і молізується. Це унеможливає його десорбцію з підповерхневих шарів. За таких самих режимів наводнювання сталь із перлітною структурою краще поглинає дифузійно-рухливий водень через збільшення площі висо-

кодефектних міжфазних границь між феритними і цементитними пластинами у перліті.

Зміни в поверхневих шарах під час десорбції відображаються на картинах відтворених рельєфів поверхні. Безпосередньо після електролітичного наводнювання зразка сталі У8 за густини струму 1 А/дм² відтворювали рельєф ділянки поверхні, наведений на рис. 3. На поверхні спостерігали формування блістерів. Упродовж 1 год після наводнювання спостерігали найбільш активний вихід водню зі зразка, утворення нових блістерів та структурні зміни у вже сформованих. Більшість блістерів мала конусоподібну форму з висотою 1,2...1,3 мкм та діаметром основи 40...80 мкм. Різницю між рельєфом ділянки поверхні, відтвореним через 1 год після наводнювання та рельєфом, відтвореним безпосередньо після наводнювання, тобто різницевий рельєф через годину після наводнювання, наведено на рис. 4.

Відомо, що за електролітичного наводнювання у приповерхневих шарах сталі У8 концентрація водню перевищує рівноважну, і він накопичується у дефектах структури [12]. Рекombінація іонів водню в молекулу супроводжується суттєвим збільшенням його об'єму і створенням всередині дефекту високого тиску газу. При цьому в підповерхневих шарах утворюються тріщини і формуються блістери (пухирці на поверхні). Під час росту тріщин і їх виходу на поверхню відбу-

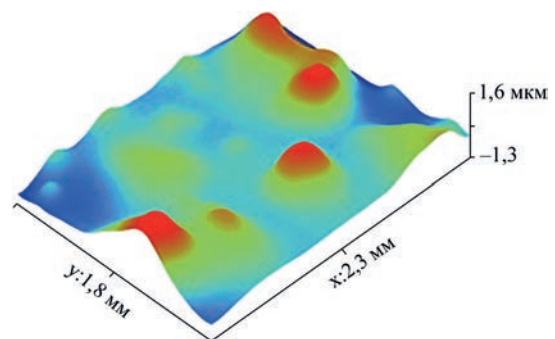


Рис. 3. Поверхня сталі У8 безпосередньо після наводнювання

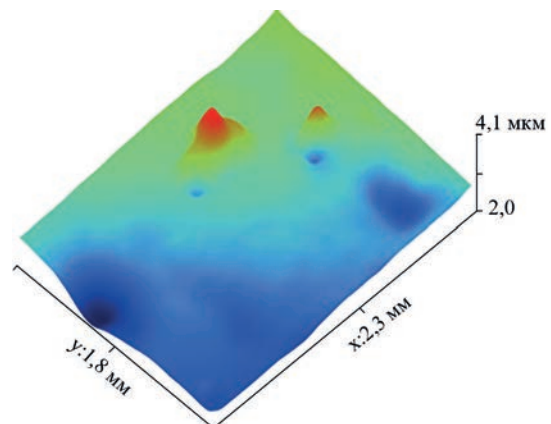


Рис. 4. Різницевий рельєф поверхні сталі У8 через 1 год після наводнювання

вається десорбція надлишкового газу, яка супроводжується зміною конфігурації та розміру блістерів. Через 2 год після наводнювання характер поверхні змінюється. Блістери збільшуються у розмірах, про що свідчить їх ріст у наведеному на рис. 5 різницевого рельєфі між відтвореними ділянками поверхні через 2 год і через 1 год після наводнювання.

Через 24 год після наводнювання висота окремих блістерів зменшилася (рис. 6), а на вершині чи боковій стороні з'явилися тріщини. Цю тенденцію наглядно показує різницевий рельєф між відтвореними ділянками поверхні через 24 год і через 2 год після наводнювання, що, очевидно, пов'язано з виведенням надлишкового молекулярного водню та інших газів із металу.

Таким чином для сталі У8 встановлено, що після насичення воднем її поверхня zdeформувалася та на ній з'явилися блістери. Під час виходу водню деформації поверхні найінтенсивніші впродовж перших двох годин після наводнювання і сильно сповільнюються через 2 тижні, а розміри блістерів збільшуються (згідно зі спостереженнями упродовж двох тижнів). Висота блістерів коли-

валася від сотень нанометрів до мікрона і більше. Після наводнювання сталі У8 спостерігали зміну рельєфу поверхні і формування блістерів, з часом форма блістерів змінювалась. Порівняння змін рельєфу сталі У8 у процесі десорбції свідчить про те, що максимальні зміни поверхні відбуваються протягом довшого періоду часу, оскільки присутність цементиту у структурі спричиняє наявність великої кількості бар'єрів для переміщення водню з підповерхневих шарів.

Висновки.

Розроблено швидкісний метод ФЗІ з ДФЗОП, який дає можливість відтворювати рельєфи наношорсткої поверхні без реєстрації розподілів інтенсивності опорного і предметного променя в інтерферометрі та без калібрування фазових зсувів опорного променя. Завдяки цьому метод можна використовувати для вивчення кінетики зміни поверхні під дією механічних навантажень або агресивних середовищ. Крім того, метод ФЗІ з ДФЗОП має можливість екстрагувати як високочастотні, так і низькочастотні складові рельєфу поверхні, включаючи 3D шорсткість і 3D хвилястість.

На основі методу ФЗІ з ДФЗОП розроблено методику встановлення найбільш імовірного місця старту втомної макротріщини, яка базується на експериментально доведеній гіпотезі про те, що максимальна шорсткість поверхні під час циклічних навантажень зразків з круглим вирізом досягається на границі ВЗП, та на критерії виявлення місця і моменту старту макротріщини за максимальним градієнтом зростання шорсткості у будь-якому пікселі відтвореного рельєфу ділянки поверхні, розташованому на границі ВЗП.

Завдяки високій швидкодії методу стали можливими дослідження впливу водню на рельєф поверхні зразків сталей. Зокрема, виконано експерименти з вивчення кінетики еволюції поверхні зразка сталі У8 після його електролітичного наводнювання. Показано, що під час виходу водню зі зразка деформації поверхні найінтенсивніші впродовж перших двох годин після наводнювання і сповільнюються через 2 тижні, а розміри блістерів збільшуються.

Список літератури / References

1. Schreiber H., Brunning J.H. (2007) Phase shifting interferometry. *Optical Shop Testing*. D. Malacara (Ed.). Hoboken, NJ, John Wiley & Sons. Chapter 14, pp. 547–666.
2. Лобанов Л.М., Муравський Л.І., Півторак В.А., Вороняк Т.І. (2017) Моніторинг напруженого стану елементів конструкцій з використанням електромагнітних хвиль оптичного діапазону. Т. 3. *Технічна діагностика матеріалів і конструкцій*. Довідн. пос. у 8-ми т. Назарчук З.Т. (ред.). Львів, Простір-М. Lobanov, L.M., Muravsky, L.I., Pivtorak, V.A., Voronyak, T.I. (2017) Monitoring the stressed state of structural

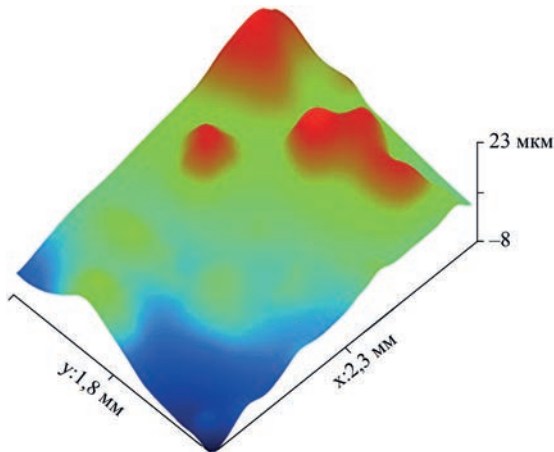


Рис. 5. Різницевий рельєф поверхні сталі У8 через 2 год після наводнювання

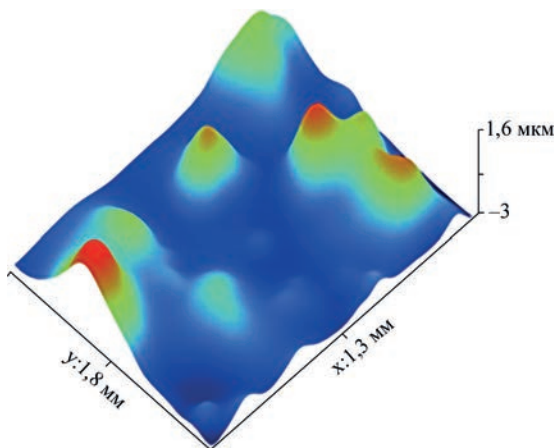


Рис. 6. Різницевий рельєф поверхні сталі У8 через 24 год після наводнювання

- elements with application of electromagnetic waves of the optical range. Vol. 3: *Technical diagnostics of materials and structures*. In: Refer. book, 8 Vol. Ed. by Z.T. Nazarchuk. Lviv, Prostir-M [in Ukrainian].
3. Schmit J., Creath K., Wyant J.C. (2007) Surface profilers, multiple wavelength, and white light interferometry. *Optical Shop Testing*. D. Malacara (Ed.). Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, Chapter 15, pp. 667–755.
 4. Muravsky L.I., Kmet' A.B., Stasyshyn I.V. et al. (2018) Three-step interferometric method with blind phase shifts by use of interframe correlation between interferograms. *Opt. Lasers Eng.*, 105, 27–34.
 5. Ostash O.P., Panasyuk V.V. (2001) Fatigue process zone at notches. *Int. J. Fatigue*, 23, 7, 627–636.
 6. Ostash O.P. (2006) New approaches in fatigue fracture mechanics. *Materials Science*, 42, 1, 5–19.
 7. Muravsky L.I., Picart P., Kmet' A.B. et al. (2016) Evaluation of fatigue process zone dimensions in notched specimens by two-step phase shifting interferometry technique. *Opt. Eng.*, 55, 10, 104108 – 1–9.
 8. Arola D., Williams C.L. (2002) Estimating the fatigue stress concentration factor of machined surfaces. *Int. J. Fatigue*, 24, 9, 923–930.
 9. Suraratchai M., Limido J., Marbu C., Chieragatti R. (2008) Modelling the influence of machined surface roughness on the fatigue life of aluminium alloy. *Ibid*, 30, 12, 2119–2126.
 10. Chan K.S., Tian J.W., Yang B., Liaw P.K. (2009) Evolution of slip morphology and fatigue crack initiation in surface grains of Ni200. *Metall. Mater. Trans. A*, 40, 11, 2545–2556.
 11. Mitsushima S., Takakuwa Y., Nagasava K. et al. (2016) Membrane electrolysis of toluene hydrogenation with water decomposition for energy carrier synthesis. *Electrocatalysis*, 7, 2, 127–131.
 12. Kanezaki T., Narazaki C., Mine Y. et al. (2008) Effects of hydrogen on fatigue crack growth behavior of austenitic stainless steels. *Int. J. Hydrog. Energy*, 33, 10, 2604–2619.

НОВЫЙ МЕТОД И СРЕДСТВА ФАЗОСДВИГАЮЩЕЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ЭВОЛЮЦИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Л.И. Муравский, Т.И. Вороняк, И.В. Стасишин

Физико-механический институт им. Г.В. Карпенко НАН Украины. 79060, г. Львов, ул. Научная, 5.

E-mail: murav@ipm.lviv.ua

Разработан скоростной метод тришаговой фазосдвигающей интерферометрии с произвольными фазовыми сдвигами опорного луча, имеющий ряд преимуществ по сравнению с известными подобными методами фазосдвигающей интерферометрии и, в первую очередь, не требует прецизионной калибровки фазосдвигающего устройства и дополнительной регистрации опорного и предметного лучей в интерферометре, а также обеспечивает плавный сдвиг фазы опорного луча. На основании метода тришаговой фазосдвигающей интерферометрии создан экспериментальный макет 3D профилометра, на котором апробированы новые методики воспроизведения рельефа поверхности, экстрагирования 3D шероховатости и волнистости, установления наиболее вероятного места старта усталостной макротрещины в образцах алюминиевого сплава D16T с вырезами при циклических нагрузках и мониторинга эволюции поверхности образцов стали У8 после гидрогенизации. В частности, показано, что макротрещина с наибольшей вероятностью стартует на границе усталостной зоны предразрушения с того места, где происходит наибольшее приращение шероховатости поверхности при усталостных нагрузках. При исследовании влияния водорода на рельеф поверхности образцов стали У8 установлено, что после насыщения водородом ее поверхность деформируется и на ней появляются блистеры. При выходе водорода из материала деформационные изменения продолжают, причем наиболее интенсивные происходят в течение первых двух часов после гидрогенизации, и существенно замедляются через две недели, а блистеры увеличиваются в размерах и изменяют форму. Библиогр. 12, рис. 6.

Ключевые слова: фазосдвигающая интерферометрия, опорный луч, шероховатость поверхности, усталостная макротрещина, блистеры

NEW METHOD AND MEANS OF PHASE SHIFTING INTERFEROMETRY FOR REPRODUCTION AND CONTROL OF STRUCTURAL MATERIAL SURFACE EVOLUTION

L.I. Muravsky, T.I. Voronyak, I.V. Stasyshyn

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine. 5 Naukova Str., 79060, Lviv, Ukraine.

E-mail: murav@ipm.lviv.ua

A fast method of three-step phase shifting interferometry with arbitrary phase shifts of the reference beam was developed. This method has a number of advantages, compared to similar methods of phase shifting interferometry, and, first of all, it does not require precise calibration of the phase-shifting device or additional recording of the reference and object beams in the interferometer, and also ensures a smooth shifting of reference beam phase. The method of three-step phase shifting interferometry was the base to create an experimental model of 3D profile meter. It was used to test new procedures of reproducing the surface relief, extraction of 3D roughness and waviness, establishing the most probable point of initiation of a fatigue microcrack in notched samples of aluminium alloy D16T under cyclic loading and monitoring the evolution of the surface of U8 steel samples after hydrogenation. It is shown, in particular, that the microcrack starts with the highest probability on the boundary of the fatigue zone of prefracture from the site, where the greatest increment of surface roughness occurs during fatigue loading. When studying the influence of hydrogen on the relief of U8 steel samples, it was found that during saturation with hydrogen its surface is deformed and develops blisters. When hydrogen escapes from the material, the deformational changes of the surface go on, the most intensive of them occurring during the first two hours after hydrogenation, and essentially slow down after two weeks, while blisters increase in size and change their shape. 12 Ref., 6 Fig.

Keywords: phase shifting interferometry, reference beams, surface roughness, fatigue macrocrack, blisters

Надійшла до редакції
19.02.2019