

УДК 539.43: 681.789

## ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРУ ВТОМНОЇ ЗОНИ ПЕРЕДРУЙНУВАННЯ МЕТОДОМ ФАЗОЗСУВНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

О. П. ОСТАШ, Л. І. МУРАВСЬКИЙ, Т. І. ВОРОНЯК, А. Б. КМЕТЬ,  
І. М. АНДРЕЙКО, В. В. ВІРА

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

Розглянуто спосіб визначення розміру втомної зони передруйнування (нового структурно-механічного параметра  $d^*$  конструкційних матеріалів) методом фазозсувної інтерферометрії, який базується на результатах порівняльного аналізу профілю поверхні металевих зразків в околі конструктивного концентратора напружень до та після певної кількості циклів навантаження. Для отримання інтерферограм у лазерному світлі використано інтерферометр Тваймана–Гріна. За ними одержано 3D-розподіл пластичних деформацій в околі вершини концентратора, за яким встановлено  $d^* = 256...268 \text{ }\mu\text{m}$  для маловуглецевої сталі 08кп за асиметрії циклу навантаження  $R = 0,1$ , що добре узгоджується зі значеннями цього параметра, встановленими іншими методами.

**Ключові слова:** *пластична деформація, вершина концентратора, розмір втомної зони передруйнування, фазозсувна інтерферометрія, одноразовий фазовий зсув фази опорного променя.*

Втомна зона передруйнування (ВЗП) біля вершини концентратора напружень у циклічно навантажуваному металевому зразку — це специфічна приповерхнева область, яка є частиною статичної ( $r_{pm}$ ) і циклічної ( $r_{pc}$ ) пластичних зон (рис. 1a). Тут під циклічним навантаженням локалізуються пластичні деформації і структурні пошкодження, що зумовлено пониженою границею текучості приповерхневих шарів і особливостями впливу вільної поверхні [1, 2]. Розмір  $d^*$  ВЗП є певна константа матеріалу для заданих умов випробувань (амплітуда навантаження, температура, середовище тощо), яка визначає максимум розмаху локальних пружно-пластичних напружень  $\Delta\sigma_y^*$  на характеристичній (критичній) віддалі  $d^*$  від вершини концентратора (рис. 1a). Такий розподіл локальних напружень підтверджено аналітично [3, 4]. ВЗП зумовлює закономірності зародження та росту системи мікротріщин [1]. Вона є головним фізичним бар'єром для мікροструктурно коротких (довжиною  $a_n$ ) і фізично малих (завдовжки  $a_{tr}$ ) мікротріщин (рис. 1b), оскільки що глибше від поверхні, то сильніший опір вони зустрічають, що спричинено зростанням локальних напружень і попередньої пластичної деформації матеріалу біля вершини концентратора (рис. 1a). Внаслідок цього більшість з цих мікротріщин стають непоширюваними і тільки одна з них, найсприятливіше орієнтована до дії зовнішніх напружень, стає макротріщиною, коли досягає довжини  $a_i = d^*$ . Час (кількість циклів навантаження), необхідний для формування макротріщини, включаючи зародження і ріст мікротріщини в межах ВЗП, є т. зв. періодом  $N_i$  до зародження макротріщини [1, 2]. Таким чином, зародження макротріщини визначають два параметри: розмах локальних напружень  $\Delta\sigma_y^*$  і лінійний параметр  $d^*$  матеріалів, тобто розмір ВЗП [1, 2].

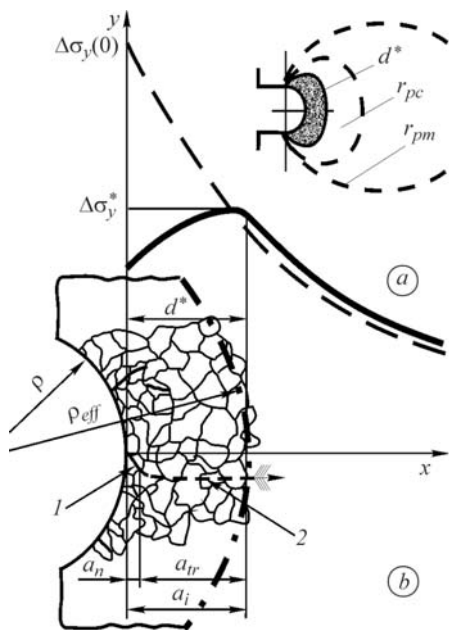


Рис. 1. Схеми формування пластичної зони і розподілу напружень в околі вершини вирізу (а) та росту мікроструктурно коротких ( $a_n$ ) і фізично малих ( $a_r$ ) втомних тріщин (b) у зоні передруйнування ( $d^*$ ): 1 – тріщина зсуву; 2 – тріщина нормального відриву.

Fig. 1. Schemes for plastic zone formation and stress distribution near the notch tip (a) and microstructurally short ( $a_n$ ) and physically small ( $a_r$ ) fatigue cracks (b) in the process zone ( $d^*$ ): 1 – mode II crack; 2 – mode I crack.

Отже, ВЗП – це локалізована область пластично деформованого матеріалу біля вершини концентратора. Її розмір залежить від механічних властивостей матеріалу та його мікроструктури [5]. Серед відомих прямих експериментальних способів визначення розміру

ВЗП найефективніший рентгеноструктурний [1, 5], проте він дуже трудомісткий. Можна також визначити зону початкового мікророзтріскування за допомогою мікрофрактографічного аналізу [1, 6], але це доцільно, коли перехід від мікро- до макротріщини супроводжується суттєвою зміною мікромеханізму руйнування (наприклад, за низьких температур [1]). Параметр  $d^*$  можна також розрахувати за результатами досліджень кінетики мікротріщин. Встановлено [5], що на повітрі і в корозивному середовищі швидкість росту доміантної мікротріщини значно зростає, коли її довжина перевищує розмір ВЗП, тобто  $a_i = d^*$ . Серед непрямих експериментальних способів визначення параметра  $d^*$  найуніверсальнішим, але також доволі трудомістким [1, 5] є базований на обробці експериментальних залежностей  $[\Delta\sigma_y(0), N_i]$  та  $(N_i, \rho)$ . Проте всі ці способи руйнівні.

Пропонуємо новий неруйнівний метод оцінювання ВЗП, в якому фазозсувну інтерферометрію застосовували для аналізу рельєфу поверхні зразків біля концентратора напружень, що змінюється внаслідок локальної пластичної деформації матеріалу [7, 8]. Для реконструкції цього рельєфу використовують дві інтерферограми: першу – для поверхні вихідного (ненавантаженого) зразка і другу – для цієї ж поверхні після одноразового зсуву фази опорного променя на довільний кут  $\alpha$  ( $0 < \alpha < \pi$ ). Подібно отримують дві інтерферограми для поверхні циклічно навантаженого зразка. Порівнюючи профілі поверхні до і після циклічного навантаження, визначають розмір ВЗП. Більшість методик фазозсувної інтерферометрії ґрунтуються на реєстрації кількох інтерферограм поверхні. Вони відрізняються тільки кутом зсуву опорного променя, який змінюють від  $\pi/2$  до  $2\pi/L$ , де  $L$  – кількість зсувів фази [9], для реалізації яких потрібні прецизійні фазозсувні пристрої та їх калібрування. Для встановлення зсуву фази на довільний кут розроблено узагальнені методи його визначення [11, 12]. Проте вони передбачають реєстрацію більше двох інтерферограм. Недавно запропоновано способи реалізації одноразового зсуву фази на довільний кут, які спрощують процедуру і зменшують кількість необхідних інтерферограм [13–17].

У цій статті подано результати апробації розробленого способу визначення параметра  $d^*$  матеріалів вдосконаленим методом фазозсувної інтерферометрії.

**Матеріали та методика досліджень.** Використовували компактні (СТ) зразки з вирізом (товщина зразків 4 mm, довжина і радіус вершини вирізу 12 і 1,5 mm

відповідно), виготовлені з маловуглецевої сталі 08кп ( $\sigma_{YS} = 190$  МПа,  $\sigma_U = 270$  МПа,  $\delta = 48\%$ ). Бокову поверхню зразків заздалегідь полірували. Інтерферограми ( $800 \times 600$  пікселів) ділянки поверхні ненавантаженого зразка площею  $10 \times 7,5$  mm<sup>2</sup> реєстрували на експериментальному обладнанні, яке включає (рис. 2): тримач для прецизійного розташування зразка; інтерферометр Тваймана–Гріна з фазозсувним пристроєм, що містить п'єзокерамічний перетворювач (PZT) і прикріплене до нього рухоме дзеркало; PZT-контролер; цифрову CCD-камеру SONY XCD-SX910CR; комп'ютер для аналізу інтерферограм за спеціально розробленим алгоритмом. Використано лазер типу ЛГН-215 з довжиною хвилі випромінювання  $\lambda = 632,8$  nm і потужністю  $P_r = 50$  mW. Для визначення фазового поля поверхні застосовано технологію з одноразовим зсувом фази опорного променя на довільний кут  $\alpha$  [8], яка дає змогу виділити фазову інформацію  $\Delta\varphi(i, j)$  про рельєф цієї поверхні. Така технологія передбачає реєстрацію двох інтерферограм досліджуваної ділянки поверхні (початкової та зі зсувом фази опорного променя на невідомий кут  $\alpha$ ), а також двох розподілів інтенсивності в об'єктному і опорному променях. Ці інтерферограми подано у вигляді

$$I_1(i, j) = I_{obj}(i, j) + I_{ref}(i, j) + 2V\sqrt{I_{obj}(i, j)I_{ref}(i, j)}\cos \Delta\varphi(i, j), \quad (1)$$

$$I_2(i, j) = I_{obj}(i, j) + I_{ref}(i, j) + 2V\sqrt{I_{obj}(i, j)I_{ref}(i, j)}\cos (\Delta\varphi(i, j) + \alpha), \quad (2)$$

а розподіли інтенсивності як

$$I_3(i, j) = I_{obj}(i, j), \quad I_4(i, j) = I_{ref}(i, j), \quad (3)$$

де  $I_{obj}(i, j)$  і  $I_{ref}(i, j)$  – інтенсивності об'єктного і опорного променів лазера в  $i, j$ -му пікселі ( $0 \leq i \leq N-1, 0 \leq j \leq M-1$ );  $V$  – контраст інтерференційних смуг.

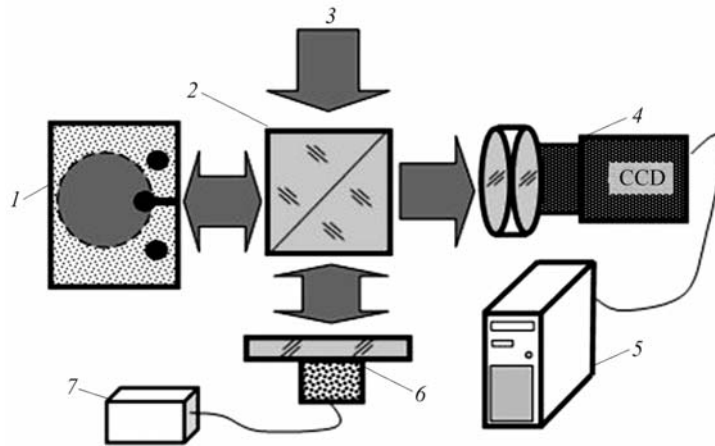


Рис. 2. Схема експериментального обладнання: 1 – зразок; 2 – світлоподільник; 3 – розширений лазерний промінь; 4 – відеокамера з проекційним об'єктивом; 5 – комп'ютер; 6 – п'єзокерамічний перетворювач з рухомим дзеркалом; 7 – контролер.

Fig. 2. Experimental setup: 1 – specimen; 2 – beamsplitter; 3 – expanded laser beam; 4 – videocamera with projection lens; 5 – computer; 6 – piezoelectric transducer (PZT) with a moving mirror; 7 – PZT control unit.

Тоді кут  $\alpha$  визначають через розподіли інтенсивностей  $I_1(i, j)$  і  $I_2(i, j)$ , використовуючи припущення, що коефіцієнт кореляції можна також визначити як косинус кута між двома багатовимірними довільними векторами [18–20]:

$$\alpha = \arccos \left( \frac{\langle (I_1(i, j) - \langle I_1(i, j) \rangle)(I_2(i, j) - \langle I_2(i, j) \rangle) \rangle}{\sigma_{I_1(i, j)} \sigma_{I_2(i, j)}} \right), \quad (4)$$

де  $\sigma_{I_1(i,j)}$  і  $\sigma_{I_2(i,j)}$  – стандартні відхилення розподілів інтенсивностей  $I_1(i,j)$  і  $I_2(i,j)$ .

Використовуючи співвідношення (1)–(4), фазову інформацію про рельєф поверхні визначили за рівнянням [8]

$$\Delta\varphi(i, j) = \arctan\left(\frac{I_1'(i, j)\cos\alpha - I_2'(i, j)}{I_1'(i, j)\sin\alpha}\right), \quad (5)$$

де  $I_1'(i, j) = I_1(i, j) - I_3(i, j) - I_4(i, j)$  та  $I_2'(i, j) = I_2(i, j) - I_3(i, j) - I_4(i, j)$ .

Для обробки інтерферограм і встановлення фазового поля рельєфу поверхні досліджуваного об'єкта створено алгоритм, який базується на визначенні функції  $\Delta\varphi(i, j)$  за рівнянням (5). Ця обробка спрощена реконструкцією тільки двох гармонійних складників інтерференційних картин і застосуванням Фур'є-фільтрації [21, 22], через що обмежилися лише одним ітераційним циклом.

**Результати та їх обговорення.** Методику апробували для визначення розміру ВЗП у зразках з концентраторами напружень шляхом порівняльного аналізу інтерферограм полірованої поверхні в околі вершини вирізу перед (рис. 3а) та після (рис. 3б, с) циклічного навантаження зразка з розмахом локальних напружень

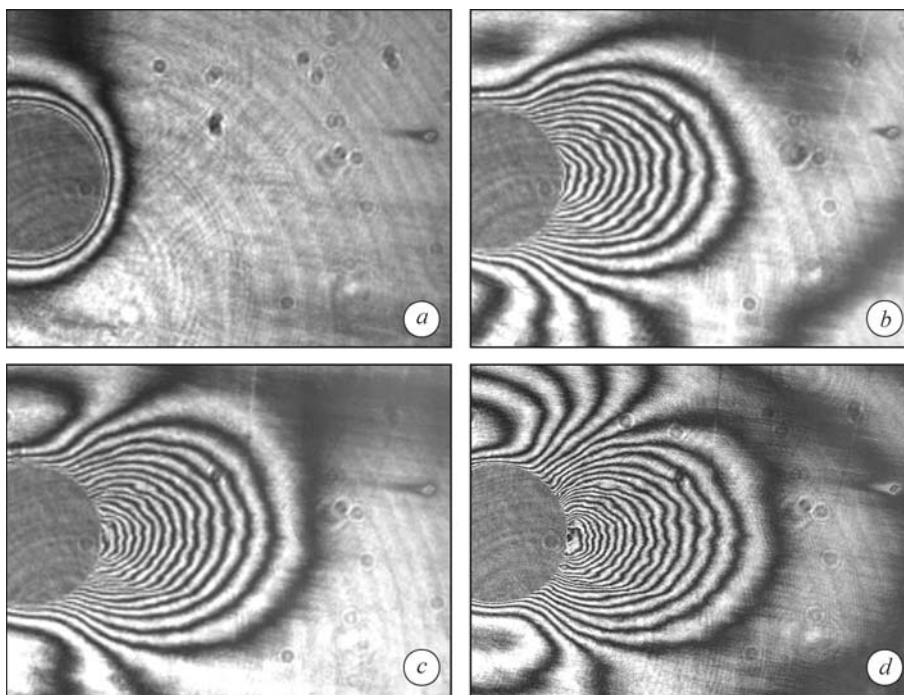


Рис. 3. Інтерферографи поверхні зразка біля вершини вирізу: перед (а) та після навантаження 100 (б), 10000 (с) і 40000 циклів (д).

Fig. 3. Interferograms of the specimen surface area at the notch tip: before loading (a); after 100 (b), 10000 (c) and 40000 (d) loading cycles.

$\Delta\sigma_y(0) = 890$  МПа за асиметрії циклу  $R = P_{\min}/P_{\max} = 0,1$  ( $P_{\max} = 4$  кН;  $P_{\min} = 0,4$  кН). За розробленим алгоритмом вивчали закономірності зміни інтерферограм після різної кількості циклів навантаження. Результати обробки даних після  $N = 100$  cycles подано на рис. 4. Видно, що циклічне фазове поле чітко профільоване (рис. 4а). Далі виявляли фазовий рельєф поверхні за допомогою відповідної програми [23] і будували його 3D-зображення (рис. 4б), ізотети фазового поля (рис. 4с) і профіль поверхні (рис. 4д) вздовж штрихової лінії, вказаної на рис. 4а. Подібні результати отримано після обробки інтерферограм, поданих на рис. 3с, д.

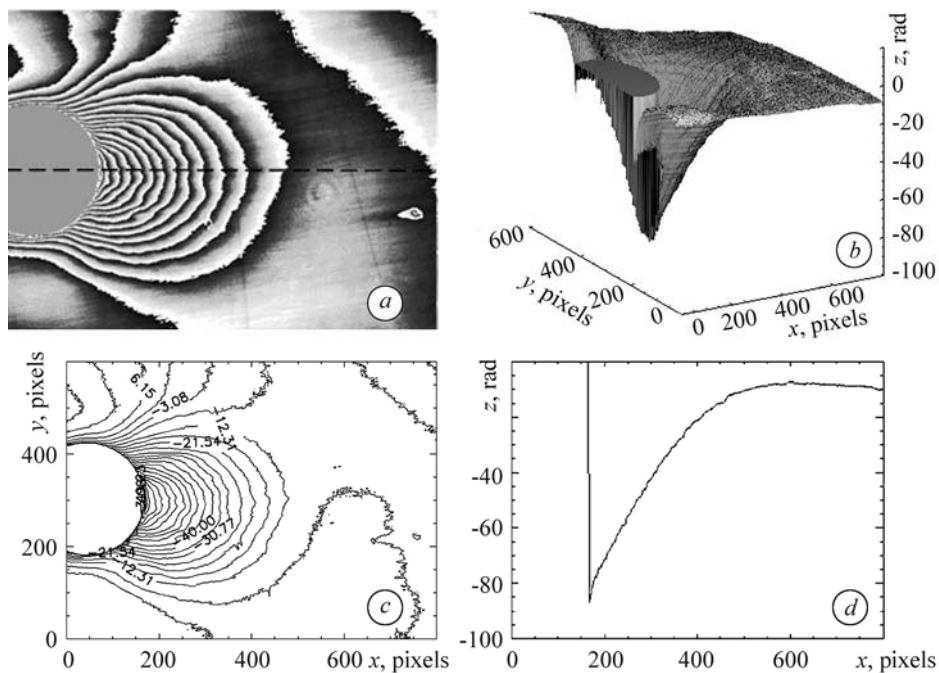


Рис. 4. Різні етапи оброблення інтерферограм після 100 cycles навантаження: *a* – циклічне фазове поле; *b* – 3D-зображення рельєфу поверхні; *c* – ізотери фазового поля; *d* – профіль поверхні вздовж штрихової лінії, вказаної на рис. 4*a*.

Fig. 4. Processing steps of interferograms obtained after 100 loading cycles: *a* – wrapped phase field; *b* – surface relief after unwrapping; *c* – phase map with increment equal to 9.23 radians; *d* – surface profile along the dashed line shown in Fig. 4*a*.

Поле переміщень поверхні встановлено відніманням рельєфу поверхні після циклічного навантаження від початкового (до навантаження). Для цього інтерактивно суміщали відповідні пікселі цих двох рельєфів. На основі побудованих полів переміщень поверхні отримано профілі поверхні біля вершини вирізу (рис. 5). В інтервалі  $N = 100 \dots 40000$  cycles навантаження профіль якісно і кількісно змінюється, при цьому точка максимального стоншення зразка, зумовленого пластичною деформацією вздовж осі  $z$  (рис. 5*b*), знаходиться на певній віддалі від вершини вирізу, що відповідає вищеописаній моделі (див. рис. 1). Після  $N = 40000$  cycles профіль був незмінним до моменту зародження макротріщини біля вершини концентратора ( $N_i = 55000$  cycles).

Таким чином, запропонована методика оцінювання зміни профілю поверхні дає можливість встановити лінійний розподіл пластичної деформації біля концентратора напружень. Характерна точка цього розподілу відповідає розміру  $d^*$  ВЗП (див. рис. 1), який визначатиме  $x$ -координата цієї точки (відносно вершини концентратора), де локальна деформація вздовж осі  $z$  сягає максимуму (рис. 5*b*), а відповідний поперечний переріз зразка – мінімуму (рис. 6). Отже, локальна пластична деформація в поперечному перерізі зразка, який відповідає точці  $x = d^*$ , рівна  $\epsilon_{xz} = 2z_x / z_0$ , де  $z_0$  – товщина зразка.

Відповідно до різницевого профілю поверхні після  $N = 40000$  cycles навантаження (рис. 5*b*) розмір  $d^*$  ВЗП рівний 21...22 pixels, а  $(Z_x)_{\max} = 117 \dots 118$  rad. Згідно з вибраним масштабом фотозйомки 1 pixel і 1 rad на інтерферограмі чи зображенні відповідають 12,17  $\mu\text{m}$  і 50,36 nm відповідно на ділянці спостереження. Тобто для маловуглецевої сталі 08кп маємо  $d^* = 256 \dots 268$   $\mu\text{m}$  при  $R = 0,1$ . Це значення добре узгоджується з визначеними іншими методами [5] експериментально

(250  $\mu\text{m}$ ) або аналітично (249...306  $\mu\text{m}$ ). При цьому зафіксовано максимальну деформацію  $\varepsilon_{xz} = 0,003$  ( $Z_0 = 4 \text{ mm}$ ).

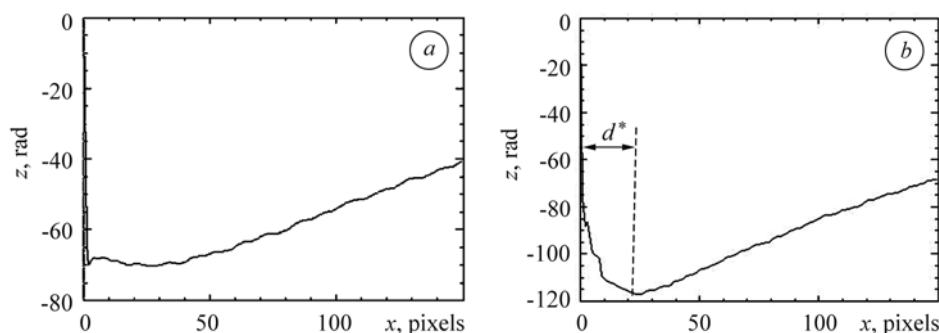


Рис. 5. Профілі деформованої поверхні біля вершини вирізу після 100 (a) і 40000 (b) циклів навантаження.

Fig. 5. Profiles of the deformed surface at the notch tip after 100 (a) and 40000 (b) loading cycles.

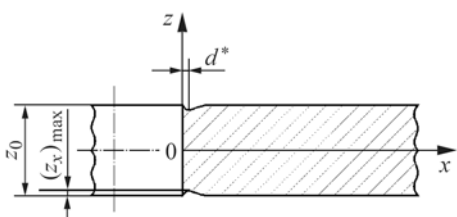


Рис. 6. Схема локалізації пластичного течіння матеріалу в поперечному перерізі біля вершини вирізу.

Fig. 6. Scheme of the material plastic flow localization in the specimen cross-section at the notch tip.

## ВИСНОВКИ

Для встановлення розміру ВПЗ (нового структурно-механічного параметра  $d^*$  матеріалів) запропоновано використовувати неруйнівний інтерферометричний метод, який базується на фазозсувній двокроковій технології реєстрації та аналізу інтерферограм оптично гладкої поверхні. Так вдається визначити характерний розподіл пластичної деформації  $\varepsilon_{xz}$  вздовж осі концентратора напружень за змінною профілю поверхні зразка в околі вершини концентратора після циклічного навантаження порівняно з вихідним (до навантаження) зразком. Для маловуглецевої сталі 08кп параметр  $d^*$  рівний у середньому 262  $\mu\text{m}$  за асиметрії циклу навантаження  $R = 0,1$ . Це значення відповідає інтервалу зміни  $d^* = 249 \dots 306 \mu\text{m}$ , визначеному іншими методами.

**РЕЗЮМЕ.** Рассмотрен способ определения размера усталостной зоны предразрушения (нового структурно-механического параметра  $d^*$  конструкционных материалов) методом фазосдвиговой интерферометрии, который базируется на данных сравнительного анализа профиля поверхности металлических образцов у вершины конструктивного концентратора напряжений до и после определенного числа циклов нагружения. Для получения интерферограм в лазерном свете использован интерферометр Тваймана–Грина. На основании таких интерферограм получено 3-D распределение пластических деформаций у вершины концентратора, по которому установлен параметр  $d^* = 256 \dots 268 \mu\text{m}$  для малоуглеродистой стали 08кп при асимметрии цикла нагружения  $R = 0,1$ , что хорошо согласуется со значениями этого параметра, установленными другими методами.

**SUMMARY.** A new method for assessment of fatigue process zone size in a notched specimen with application of phase-shifting interferometry is proposed. The phase-shifting technique with arbitrary unknown one-shot phase shift of a reference beam was used to reconstruct the smooth surface area at the notch tip. The metal specimen surface area before and after fatigue loading was studied by the Twyman–Green interferometer. Using such interferograms a 3-D distribution of plastic deformation at the notch tip was found, which was applied for evaluation

of the parameter  $d^* = 256...268 \mu\text{m}$  for mild 08кп steel at stress ratio  $R = 0.1$ . This agrees well with the values of this parameter, obtained by other methods.

1. *Ostash O. P., Panasyuk V. V., Kostyk Ye. M.* A phenomenological model of fatigue macrocrack initiation near stress concentrators // *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* – 1999. – **22**. – P. 161–172.
2. *Осташ О. П.* Нові підходи в механіці втомного руйнування // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2006. – № 1. – С. 13–25.  
(*Ostash O.P.* New approaches in fatigue fracture mechanics // *Materials Science.* – 2006. – **42**, № 1. – P. 5–19.)
3. *Pluvinage G.* Fatigue and fracture emanating from notch; the use of the notch stress intensity factor // *Nuclear Engng. Design.* – 1998. – **185**. – P. 173–184.
4. *Application of a new model proposal for fatigue life prediction on the notches and key-seats / G. Qylafku, Z. Azari, N. Kadi, et al.* // *Int. J. Fatigue.* – 1999. – **21**. – P. 753–760.
5. *Ostash O. P. and Panasyuk V. V.* Fatigue process zone at notches // *Ibid.* – 2001. – **23**. – P. 627–636.
6. *Effect of ferritic microstructure on local damage zone distance associated with fracture near notch / G. Pluvinage, Z. Azari, N. Kadi, et al.* // *Theor. Appl. Fract. Mech.* – 1999. – **31**. – P. 149–156.
7. *Патент України № 42549.* Метод визначення розміру втомної зони передруйнування / О. П. Осташ, Л. І. Муравський, І. М. Андрейко та ін. – Липень, 2009.
8. *Вороняк Т., Кметь А., Муравський Л.* Дослідження мікрорельєфу поверхні твердого тіла та її переміщень за методом фазозсувної інтерферометрії // *Механіка руйнування і міцність конструкцій / Під заг. ред. В. В. Панасюка.* – Львів: Фіз.-мех. ін.-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2009. – С. 377–382.
9. *Cheng Y.-Y. and Wyant J. C.* Phase shifter calibration in phase-shifting interferometry // *Appl. Opt.* – 1985. – **24**. – P. 3049–3052.
10. *Greivenkamp J. E.* Generalised data reduction for heterodyne interferometry // *Opt. Eng.* – 1984. – **23**. – P. 350–352.
11. *Li W., Su X.* Real-time calibration algorithm for phase shifting in phase measurement profilometry // *Ibid.* – 2001. – **40**. – P. 761–766.
12. *Patil A. and Rastogi P.* Approaches in generalized phase shifting interferometry // *Opt. Lasers Eng.* – 2005. – **43**. – P. 475–490.
13. *Phase-shifting error and its elimination in phase-shifting holography / C. S. Guo, L. Zhang, H. T. Wang, et al.* // *Opt. Lett.* – 2002. – **27**. – P. 1687–1689.
14. *Wavefront reconstruction without twin-image blurring by two arbitrary step digital holograms / G. L. Chen, C. Y. Lin, H. F. Yan, et al.* // *Opt. Express.* – 2007. – **15**. – P. 11601–11607.
15. *Blind phase shift extraction and wavefront retrieval by two-frame phase-shifting interferometry with an unknown phase shift / X. F. Xu, L. Z. Cai, Y. R. Wang, et al.* // *Opt. Commun.* – 2007. – **273**. – P. 54–59.
16. *Generalized phase-shifting interferometry with arbitrary unknown phase shifts: Direct wavefront reconstruction by blind phase shift extraction and its experimental verification / X. F. Xu, L. Z. Cai, Y. R. Wang, et al.* // *Appl. Phys. Lett.* – 2007. – **90**. – P. 121124-1–121124-3.
17. *Zhang H.* Generalized phase-shifting interferometry with arbitrary unknown phase shifts: Direct wave-front reconstruction by blind phase shift extraction and its experimental verification // *Ibid.* – 2007. – **90**. – P. 121124-1–121124-3.
18. *Draper N. and Smith H.* *Applied Regression Analysis.* – New York: Wiley, 1981. – 709 p.
19. [http://en.wikipedia.org/wiki/Pearson\\_product-moment\\_correlation\\_coefficient](http://en.wikipedia.org/wiki/Pearson_product-moment_correlation_coefficient)
20. *Van Brug H.* Phase-step calibration for phase-stepped interferometry // *Appl. Opt.* – 1999. – **38**. – P. 3549–3555.
21. *Shulev A., Russev I., and Sainov V.* New automatic FFT filtration method for phase maps and its application in speckle interferometry // *SPIE Proc.* – 2003. – **4933**. – P. 323–327.
22. *Вороняк Т. І., Кметь А. Б., Личак О. В.* Фазозсувна спекл-інтерферометрія з одноразовим зсувом фази // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2007. – № 4. – С. 93–102.  
(*Voronyak T. I., Kmet' A. B., Lychak O. V.* Single-step phase-shifting speckle interferometry // *Materials Science.* – 2007. – **43**, № 4. – P. 554–567.)
23. *Ghiglia D. C. and Pritt M. D.* *Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software.* – New York: John Wiley & Sons, 1998. – 512 p.

Одержано 09.08.2010