

ВИБІР БАЗИ ВИМІРЮВАННЯ ПЕРЕМІЩЕНЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ МЕТОДОМ ОПТИКО-ЦИФРОВОЇ КОРЕЛЯЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ

Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ, П. С. КУНЬ, Т. М. ЛЕНКОВСЬКИЙ,
Ю. В. МОЛЬКОВ, С. Т. ШТАЮРА

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

Проаналізовано вплив розміру бази вимірювання переміщень точок поверхні на відповідні макродеформації. Встановлено алгоритм пошуку її розміру в неоднорідному полі деформацій. Для зразка зі сталі 20, розтягнутого заданим зусиллям, визначено оптимальний розмір бази, його співвідношення з розміром структурного елемента та зв'язок з відомими характеристиками матеріалу.

Ключові слова: база вимірювання, мікроструктура матеріалу, переміщення, макродеформація, оптико-цифрова кореляція.

Для продовження ресурсу роботи обладнання важливо встановити реальний напружено-деформований стан з урахуванням пошкоджень матеріалу, набутих після тривалої експлуатації. Особливо це актуально, коли в матеріалі виникли зони пружно-пластичних деформацій, які можна виявити, контролюючи елементи конструкцій методом оптико-цифрової кореляції [1, 2].

Детальне дослідження деформаційного стану поверхонь елементів конструкцій під час експлуатації вимагає оптимального вибору розміру бази вимірювання переміщень точок поверхонь внаслідок зміни зовнішніх навантажень, умов середовища чи повзучості.

Теоретичні моделі та розрахунки розподілу полів напружень і деформацій у твердих деформівних тілах, як правило, ґрунтуються на припущеннях про їх однорідність. Це дає можливість використовувати добре опрацьовані класичні і сучасні математичні методи із граничними переходами нескінченно малих і великих величин. Але під час деформування матеріали реальних конструкцій лише наближено можуть задовольняти умову однорідності, і то на макрорівні, оскільки вони суттєво неоднорідні на мікрорівні через кристалічну (зернисту) мікроструктуру. Тому оперувати малими, сумірними з розмірами структурних елементів матеріалу, величинами баз вимірювання переміщень неприпустимо під час визначення деформацій точок досліджуваної поверхні.

За теоретичним визначенням, для однорідного тіла, що перебуває під дією системи зовнішніх силових чинників (рис. 1), значення лінійної деформації в точці $A(x, y)$ у напрямку \vec{n} на базі b буде:

$$\varepsilon_{\vec{n}} = \lim_{b \rightarrow 0} \frac{b^* - b}{b}. \quad (1)$$

За плоскої деформації в будь-якій точці поверхні переміщення і деформації мають свої компоненти вздовж двох осей координат. У цьому випадку теоретичні формули Коші, зокрема для лінійної компоненти деформації [3] ε_x , такі:

$$\varepsilon_y = \begin{cases} \frac{\partial v}{\partial y} & \text{– малі деформації;} \\ \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] & \text{– скінченні,} \end{cases} \quad (2)$$

де u, v – складники переміщень точки $A(x, y)$ по осях Ox, Oy .

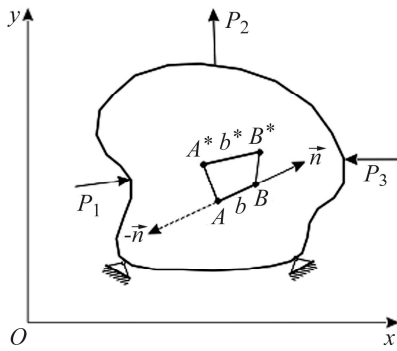


Рис. 1. Fig. 1.

Рис. 1. Визначення лінійної деформації в точці A у заданому напрямку.

Fig. 1. Determination of linear strain at a point A in the preset direction.

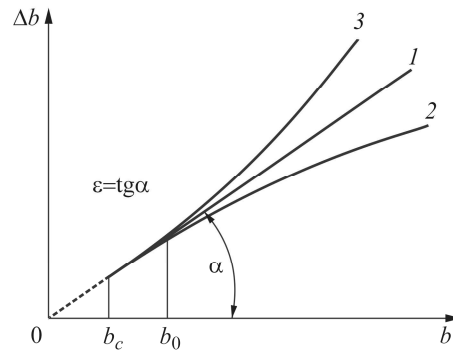


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Схема збіжності деформації в однорідному (1) та неоднорідному (2, 3) полях.

Fig. 2. A chart of strain convergence in homogeneous (1) and nonhomogeneous (2, 3) fields.

У напрямку бази вимірювань по осі Oy

$$\frac{\partial v}{\partial y} = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta y} = \lim_{b \rightarrow 0} \frac{\Delta b}{b}, \quad (3)$$

де b – розмір бази вимірювання; $\Delta v, \Delta y, \Delta b$ – відповідні прирости.

У реальних умовах задовольнити граничний перехід $b \rightarrow 0$ практично неможливо з технічних причин і некоректно в принципі, бо зменшувати як завгодно розмір бази не можна, якщо мова йде про макродеформацію. Тому її розмір повинен суттєво перевищувати розмір зерна структури матеріалу, принаймні на порядок, що є першою умовою. Тобто

$$b \gg d, \quad (4)$$

де d – розмір зерна мікроструктури матеріалу.

На стандартизованих циліндричних зразках базою вимірювання переміщень є довжина робочої зони зразка l_0 . Деформацію (відносно видовження) зразка визначають зі співвідношення приросту довжини зразка $\Delta l = l - l_0$ до початкової довжини робочої зони:

$$\varepsilon_{sp} = \Delta l / l_0. \quad (5)$$

До появи шийки деформований стан зразка однорідний по довжині і розмір бази визначення деформацій може бути довільним (рис. 2, крива 1). У зоні шийки її визначають за подібною до формули (5) залежністю, тільки на значно меншій (сумірній із висотою шийки) базі вимірювання.

Оскільки формула (5) наближена, бо не враховує зміну довжини зразка (чи бази вимірювання) під час деформування, то ввели поняття істинної (логірифімічної) деформації:

$$\bar{\varepsilon}_{sp} = \ln(1 + \Delta l / l_0) = \ln(1 + \varepsilon_{sp}). \quad (6)$$

У залежностях (2), (3), (5), (6) лінійні видовження типу $\Delta b/b$ або $\Delta l/l_0$ визначальні, бо деформації (малі, одновимірні, скінченні, істинні) є функціями від них.

На практиці, задовольняючи умову (4), важливо ще досягнути збіжності значень шуканих деформацій до певного значення на деякому проміжку $b_c < b < b_0$ зміни розмірів баз, що є другою умовою цього вибору. Вивчали (рис. 2) вплив зменшення параметра b на досягнення шуканого значення лінійної деформації, яка у вибраних координатах залежить від тангенса кута α . Тут база вимірювання потрапляє у певну зону відносної однорідності деформацій, що вказує на їх незалежність. Зрозуміло, що для високих значень деформацій необхідні менші розміри баз вимірювання, бо розміри ділянок їх локалізації обернено пропорційні значенням деформацій.

Щоб підтвердити реальну можливість встановити оптимальний (що задовольняє дві вищенаведені умови) розмір бази визначення деформацій, розтягували дискові зразки зі сталі 20 товщиною 3 mm, діаметром $D = 120$ mm і боковим надрізом з радіусом заокруглення 0,2 mm (рис. 3a). Вершину надрізу розташовували на віддалі 10 mm від лінії прикладання зусиль розтягу. Виявили (рис. 3b), що феритні зерна в сталі переважають перлітні кількісно і за розмірами (максимальний приблизно 35 μm), характерними для більшості конструкційних сталей [4, 5].

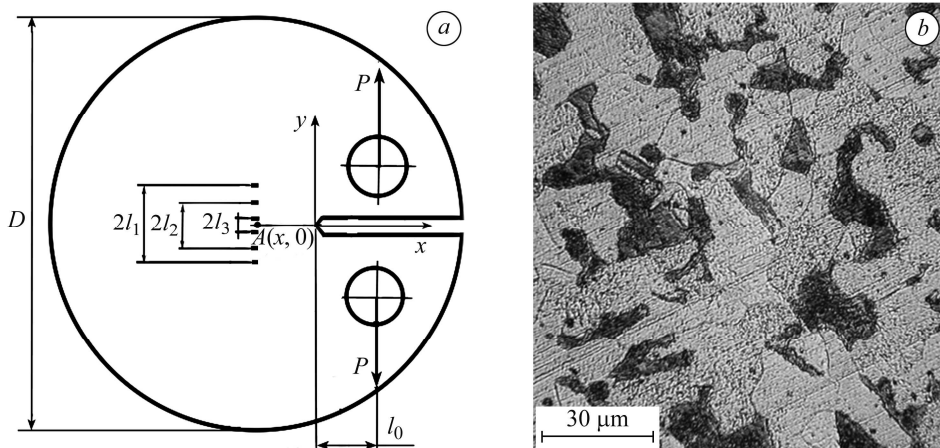


Рис. 3. Дисковий зразок зі сталі 20 для випробувань на позакентровий розтяг (a) та мікроструктура матеріалу (b).

Fig. 3. Steel 20 disk specimen for eccentric tension tests (a) and microstructure of material (b).

Оптична система для отримання зображень складається з цифрової камери TourTech UCMOS 10000KPA з роздільною здатністю 3600×2800 pixels, жорстко закріпленої до нерухої траверси випробувальної машини, і світлодіодного джерела світла [6]. Масштаб отриманих зображень 200 pixel/mm, що забезпечує достатній діапазон розмірів баз визначення деформації.

У стандартних лабораторних умовах зразки навантажували статично позакентровим розтягом на механічній розривній машині FP-100 за швидкості переміщення рухоми траверси 2 mm/min. Під час випробувань динамометром реєстрували навантаження, а сигнали записували у комп'ютер за допомогою аналого-цифрового перетворювача і відповідного програмного забезпечення.

Ділянку поверхні зразка фотографували так, щоб перший кадр відповідав моменту до навантаження, а частота зйомки 1fps дорівнювала частоті реєстрації зусилля навантаження, що давало можливість з достатньою точністю встановити для кожного зображення рівень навантаження, прикладеного до зразка у момент його реєстрації.

Виявили (рис. 4), що за дії статичного зусилля розтягу $P = 1140$ kg обчислені на продовженні тріщини значення деформацій для п'яти довжин баз, починаючи від 10,2 до 0,5 mm, зберігають тенденцію збіжності за траєкторією кривої 2 на рис. 2 упродовж всього проміжку вимірювання. При цьому три найменших бази, числові розміри яких значно (на порядок) перевищують характерні мікроструктурних елементів сталі 20, дають дуже близькі значення деформацій навіть в околі вершини концентратора. Тобто обчислені деформації вже фактично не залежать від вибору бази вимірювання, а є характеристиками заданого напружено-деформованого стану матеріалу за певних умов.

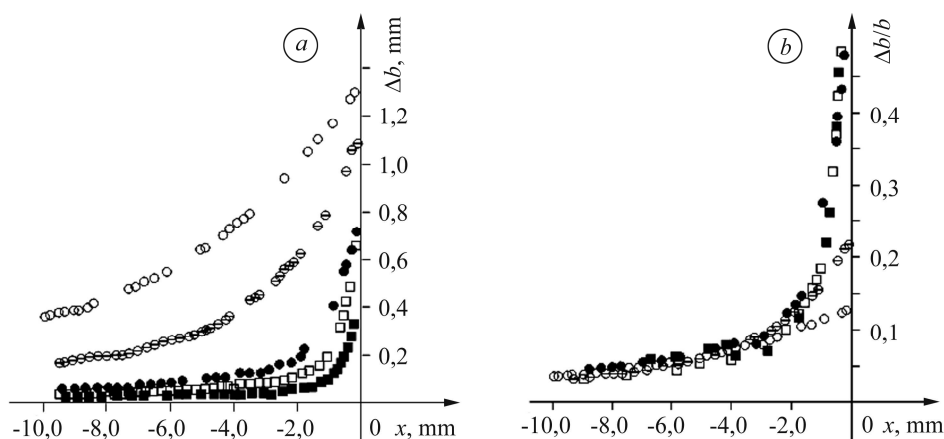


Рис. 4. Розподіл переміщень (a) та деформацій (b) перед вершиною тріщини для різних баз вимірювання: ○ – 10,2 mm; □ – 4,0; ● – 1,5; □ – 1,0; ■ – 0,5 mm.

Fig. 4. Distribution of displacements (a) and strain (b) near the crack tip for different measuring spacing size: ○ – 10.2 mm; □ – 4.0; ● – 1.5; □ – 1.0; ■ – 0.5 mm.

Зауважимо, що отримані оптимальні значення величин баз вимірювання переміщень добре корелюють зі значенням [7] деформаційної макрохарактеристики матеріалів, хоча дещо її перевищують. Зокрема, в праці [7] наближений зв'язок між макродеформацією ϵ пружно-пластичного тіла біля вершини тріщини і розкриттям δ вершини тріщини визначено за висотою h елементарного об'єму. Для моменту руйнування ця залежність набуває вигляду

$$h_c = \delta_c / \epsilon_c, \quad (7)$$

де індекс c вказує на значення деформаційних характеристик за граничної рівноваги тіла з тріщиною. При цьому характеристику ϵ_c встановлюють з діаграми руйнування матеріалу за розтягу, а критичне розкриття вершини тріщини δ_c – за формулою [7]

$$\delta_{Ic} = \frac{K_c^2}{E \cdot \sigma_{0,2}}, \quad (8)$$

де E – модуль Юнга матеріалу; $\sigma_{0,2}$ – його умовна границя плинності; K_c – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень за статичного розтягу в умовах плоского напруженого стану.

Параметр h_c , знайдений за механічними характеристиками та тріщиностійкістю для сталі 20 ($E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, $\sigma_{0,2} = 300$ МПа, $K_c = 100$ МПа·м^{1/2}), становить 0,3 mm, що відповідає мінімальному подвійному значенню шуканої бази вимірювання деформацій ($h_c = 2 \cdot b_c$) у момент критичної рівноваги тіла з тріщиною. Тому він може служити орієнтиром для пошуку бази вимірювання. За його відсутності оптимальну базу вимірювання треба визначати за вище наведеною процедурою, задовольняючи умови макророзміру бази та збіжності шуканих деформацій. А деформаційний моніторинг реальних конструкційних об'єктів в експлуатаційних умовах достатньо виконувати за більших від h_c розмірів баз, залежно від концентраторів напружень і неоднорідності напружено-деформованого стану біля них.

РЕЗЮМЕ. Проаналізовано влияние размера базы измерения поверхностных перемещений на значение соответствующих макродеформаций. Определен алгоритм поиска размера базы измерения в неоднородном поле деформаций. Для образца из стали 20, растянутого заданным усилием, найдены оптимальный размер базы измерения, его соотношение с размером структурного элемента, а также связь с известными характеристиками материала.

SUMMARY. Influence of measuring spacing size of surface displacements on the values of the corresponding macroscale strain is analysed. The algorithm of measuring spacing size in the nonuniform strain field is determined. On the example of mild steel disk specimen tensioned by the certain force the optimum size of measuring spacing is determined and its correlation with microstructure parameters of the material and connection with the known characteristics of the material is shown.

1. *Muravsky L. I., Maksymenko O. P., and Sakharuk O. M.* Use of a joint transform correlator architecture for study of speckle displacements // Opt. Commun. – 2004. – 240, Issues 4–6. – P. 275–291.
2. *Increase of reliability of surface displacement field recovery by optical speckle-displacement correlation technique / L. I. Muravsky, O. M. Sakharuk, N. V. Fityo, P. V. Yezhov* // Opt. Lasers Eng. – 2007. – 45, Issue 10. – P. 993–1000.
3. *Бургер И. А., Мавлютов Р. Р.* Сопротивление материалов: Учеб. пос. – М.: Наука, 1986. – 560 с.
4. *Influence of 65G steel microstructure on crack faces friction factor under mode II fatigue fracture / Y. L. Ivanytskyj, T. M. Lenkovskiy, Y. V. Molkov, V. V. Kulyk, Z. A. Duriagina* // Archives of Mat. Sci. and Engng. – 2016. – 82/2. – P. 49–56.
5. *Study of main gas pipeline steel strain hardening after prolonged operation / P. O. Maruschak, U. V. Salo, R. T. Bishchak, L. Y. Poberezhnyi* // Chemical and Petroleum Eng. – 2014. – 50/1-2. – P. 58–61.
6. *Панасюк В. В., Іваницький Я. Л., Максименко О. П.* Аналіз пружно-пластичного деформування матеріалу зони передруйнування // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – 40, № 5. – С. 67–72.
(*Panasyuk V. V., Ivanyts'kyi Ya. L., and Maksymenko O. P.* Analysis of the elastoplastic deformation of the material in the process zone // Materials Science. – 2004. – 40, № 5. – P. 648–655.)
7. *Андрейкив А. Е.* Пространственные задачи теории трещин. – К.: Наук. думка, 1982. – 346 с.

Одержано 16.08.2017