

АЛГОРИТМ ОБРОБКИ СПЕКЛ-ЗОБРАЖЕНЬ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ЗМІНИ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ БІЛЯ КОНЦЕНТРАТОРА НАПРУЖЕНЬ

On the basis of digital correlation of the speckle images a way for assessment the spatial dimension of the plastic zone for compact materials specimens in the time they cyclic loading is proposed. Experimental setup for the speckle images registration and the algorithm they processing are described.

Keywords: *speckle images, digital speckle images correlation, plastics zone.*

На основі цифрової кореляційної обробки спекл-зображень запропоновано спосіб оцінки просторових розмірів пластичної зони компактних зразків матеріалів під час циклічних навантажень. Описано експериментальну установку для реєстрації спекл-зображень і алгоритм їх обробки.

Ключові слова: *спекл-зображення, цифрова кореляція спекл-зображень, пластична зона.*

Щоб визначити залишкову міцність конструкцій, необхідні ефективні методи оцінки тріщиностійкості матеріалів. Усереднене значення тріщиностійкості матеріалу можна отримати, визначивши характерні розміри пластичної зони (ПЗ), наприклад, за методом цифрової кореляції спекл-зображень (ЦКСЗ) [6].

Існує багато інших методів оцінювання форми та характерних розмірів ПЗ, які використовують різні фізичні явища. Серед них можна виділити такі методи:

- які реагують на об'ємні зміни у структурні матеріалу: металографічні [3], рентгенівські [14];
- деформаційні, коли розміри ПЗ окреслюється за величиною деформацій: метод сіток [2], фотопружних покривів [1], муару, голографії і спекл-інтерферометрії [5] та ЦКСЗ [6, 8];
- які визначають ПЗ за зміною мікрорельєфу [4], шорсткості [9, 11, 12], або текстури поверхні [7].

Кожний із зазначених методів має свій діапазон вимірювання та просторове розділення і використовується залежно від матеріалу зразка і умов експерименту, однак більшість із них потребує складного обладнання і трудомісткі в реалізації. Проведений аналіз виявив, що найбільш зручними для практичної реалізації є методи, які визначають розміри ПЗ за зміною шорсткості поверхні. Однак і ці методи також досить складні в реалізації. Наприклад, за методом [9] використовують сфокусований лазерний промінь і для окреслення розмірів ПЗ потрібна спеціальна система сканування поверхні зразка. У методі [11] необхідно точне позиціонування зразка, для чого використовують спеціальний фіксуєчий пристрій, а за методом [12] для точного суміщення спекл-зображень систему реєстрації зображень кріплять до випробувальної машини та використовують спеціальний алгоритм суміщення цифрових зображень під час їх обробки.

Технічна складність практичної реалізації відомих методів оцінки просторових розмірів ПЗ, паразитна декореляція спекл-зображень, викликана зміною геометрії зразка і освітлення, які виникають під час тривалих циклічних випробувань, зумовлюють необхідність розробки нових завадостійких алгоритмів реєстрації і обробки спекл-зображень.

Зразок та схема вимірювання. Для проведення експериментальної перевірки методів цифрової кореляції спекл-зображень, для оцінки просторових розмірів

ПЗ за зміною шорсткості поверхні використовували компактні зразки, виготовлені з листового дюралюмінію Д16 товщиною 4 mm. Зразки мали виріз від краю довжиною 12 mm, у вершині якого розміщувався отвір радіусом 1,5 mm (рис. 1а). Поверхню зразка до проведення випробувань полірували.

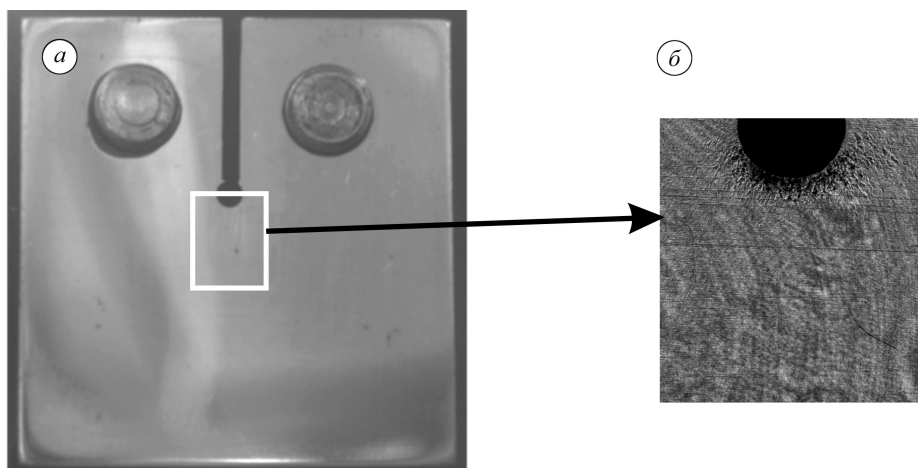


Рис. 1. Фото компактного зразка (а) і спекл-зображення поверхні біля отвору (б).

Після певної кількості циклів втомного навантаження зразок знімали з навантажувальної машини і встановлювали в спеціальний тримач з кріпленням для реєстрації спекл-зображень. Зображення розміром 800×600 пікселів (рис. 1б), ділянки поверхні зразка розміром 10×7,5 mm, біля отвору, реєстрували за допомогою схеми, наведеної на рис. 2. На схемі зображено лазер ЛГН-215, де 1 – довжина хвилі випромінювання $\lambda = 632,8 \text{ nm}$, потужністю $P = 50 \text{ mW}$; 2 – розширювач лазерного променя; 3 – дзеркало; 4 – світлоподільний кубик; 5 – об’єктив; 6 – цифрова відеокамера SONY XCD-SX910CR, підключена до комп’ютера 7 з програмним забезпеченням для обробки спекл-зображень; 8 – зразок, розміщений в тримачі 9 з кріпленням 10, для його прецизійного розташування. Вся експериментальна установка, зібрана за цією схемою, розміщувалась на інтерферометричному столі 11.

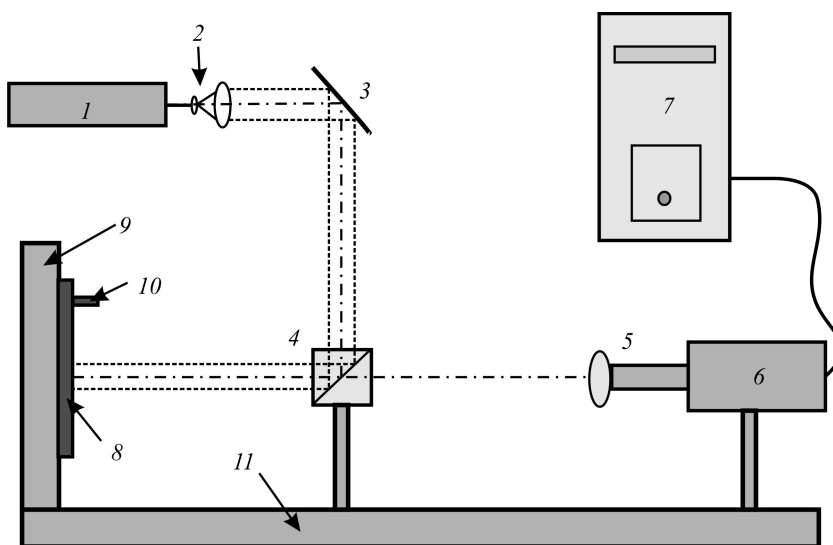


Рис. 2. Експериментальна установка для реєстрації спекл-зображень поверхні зразка.

Алгоритм обробки спекл-зображень. У процесі формування ПЗ у деяких матеріалах спостерігається суттєва зміна шорсткості поверхні [13]. На рис. 1б показано типове спекл-зображення поверхні зразка, зареєстроване після 50000 циклів втомного навантаження, які ми спостерігали під час досліджень. Використовуючи явище зміни шорсткості поверхні, у процесі формування ПЗ, в роботі [12] запропоновано метод визначення характерних розмірів ПЗ під час циклічного навантаження балкових зразків згинальним моментом, який базується на декореляції спеклів. За цим методом реєструють послідовно серію спекл-зображень поверхні зразка, які розбивають на фрагменти і розраховують крос-кореляційні коефіцієнти $CF(m, n)$ між сусідніми зображеннями, для кожної пари фрагментів розміром (m, n) пікселів

$$CF(m, n) = \frac{R^{CM} - R^{AVR}}{R^{AVR}}, \quad (1)$$

де: R^{CM} – амплітуда піка крос-кореляції між відповідними фрагментами двох зображень; R^{AVR} – середнє значення сигналу навколо піка крос-кореляції фрагментів.

Для зменшення впливу нерівномірності освітлення зразка під час реєстрації спекл-зображень значення коефіцієнта крос-кореляції $CF(m, n)$ нормуються щодо коефіцієнта автокореляції $CF^A(m, n)$, який розраховують аналогічно за виразом (1), для першого зображення у кожному відповідному фрагменті. Остаточний нормований коефіцієнт крос-кореляції в роботі [12] визначався так:

$$CF^N(m, n) = \frac{CF(m, n)}{CF^A(m, n)}. \quad (2)$$

Для усунення впливу руху зразка як твердого тіла за цим методом автори корегують зміщення фрагмента зображення як твердого тіла, розраховуючи значення зміщення піка крос-кореляції відносно центра кожного фрагмента.

Використовуючи вираз (2), була розроблена програма обробки спекл-зображень, які ми отримували під час проведення втомних випробувань компактних зразків. У програмі передбачена можливість виділення області розрахунку на зображенні, встановлення розмірів фрагментів і застосування алгоритму усунення руху зразка як твердого тіла. Результати обробки спекл-зображень, отриманих нами під час втомних випробувань зразків, для фрагментів розмірів 16×16 пікселів, які перекривались з кроком 3 піксела, за різної кількості циклів навантаження зображені на рис. 3а, де показано просторовий розподіл коефіцієнтів крос-кореляції, розрахованих за виразом (2). Незважаючи на те, що загалом, кореляційні методи, які використовують нормування сигналу, мало чутливі до зміни умов освітлення, алгоритм обробки спекл-зображень за виразом (2) виявив незадовільний результат. За методом [12] ПЗ окреслюється з малим просторовим розділенням і виникають від'ємні значення коефіцієнта крос-кореляції $CF^N(m, n)$, що свідчить про низьке співвідношення с/ш у деяких фрагментах, зумовлене значною паразитною декореляцією спеклів. Паразитна декореляція спеклів під час наших експериментів зумовлена зміною умов освітлення зразка, оскільки компактний зразок для реєстрації спекл-зображень знімався з навантажувальної машини і встановлювався в схему реєстрації на наступний день після циклічних навантажень. Крім того, під час випробувань зразок деформується, у результаті чого змінюється його геометрія та кут між нормаллю до площини зразка і оптичною віссю напрямку спостереження, що негативно впливало на повторюваність умов реєстрації спекл-зображень.

Для усунення цих недоліків ми запропонували інший, більш завадостійкий алгоритм обробки спекл-зображень, який дав змогу достовірніше визначати просторові розміри ПЗ.

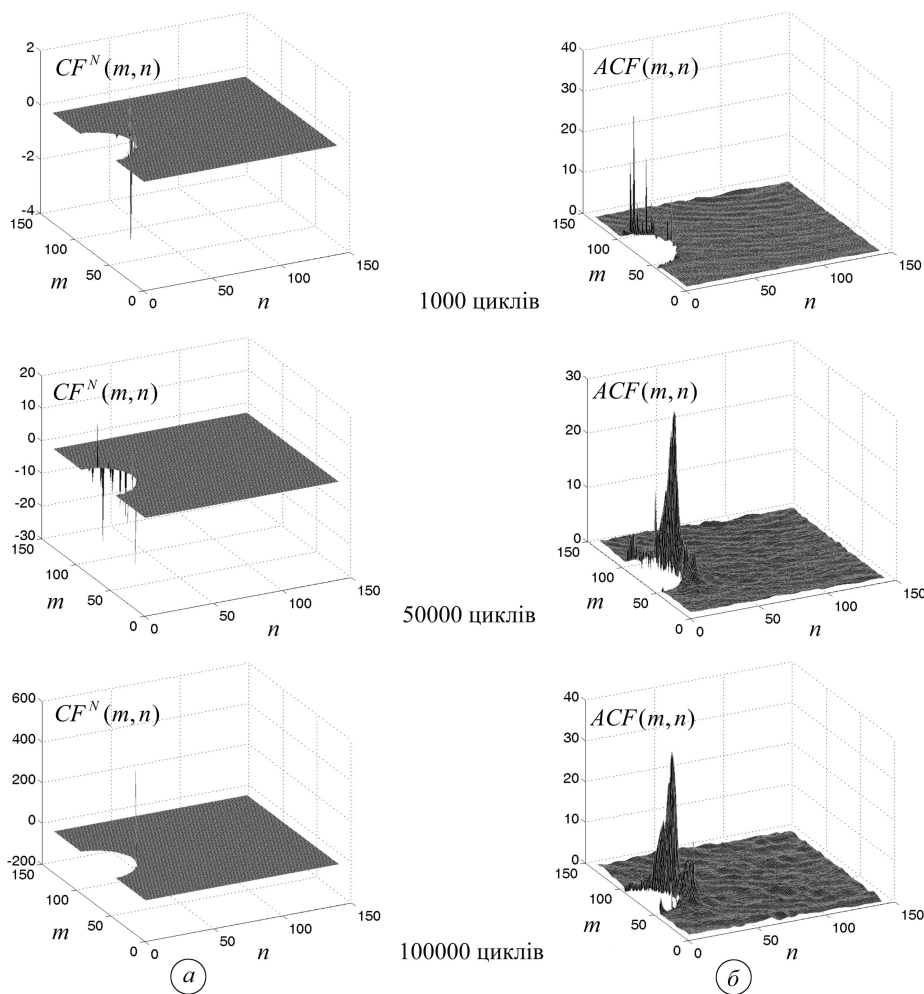


Рис. 3. Просторовий розподіл коефіцієнтів крос-кореляції $CF^N(m, n)$ (а) і автокореляції $ACF(m, n)$ (б).

Враховуючи, що характерні розміри і кількість спеклів визначаються серед іншого шорсткістю поверхні, при незмінних умовах освітлення і спостереження, то ці параметри спекл-зображення будуть змінюватись зі зміною шорсткості поверхні [10]. З іншого боку, середні розміри і кількість спеклів у кожному фрагменті зображення можна оцінити за допомогою автокореляційної функції. Тому для кількісної оцінки залежності шорсткості від параметрів спеклів ми порівнювали амплітудні значення автокореляційних функцій відповідних фрагментів двох спекл-зображень, зареєстрованих через певну кількість циклів навантаження, розраховуючи автокореляційний коефіцієнт у кожному фрагменті так:

$$ACF(m, n) = \frac{R^{AM1} - R^{AVR1}}{R^{AM2} - R^{AVR2}}, \quad (3)$$

де R^{AM1} – амплітуда піка автокореляції фрагмента першого зображення; R^{AVR1} – середнє значення сигналу, оточуючого пік автокореляції фрагмента першого зображення; R^{AM2} – амплітуда піка автокореляції фрагмента другого зображення; R^{AVR2} – середнє значення сигналу, оточуючого пік автокореляції фрагмента другого зображення.

Розраховані нами просторові розподіли автокореляційного коефіцієнта за виразом (3) $ACF(m,n)$, для таких же розмірів фрагментів, як і для першого способу, зображені на рис. 3б. Як видно з наведених результатів, автокореляційний коефіцієнт у всіх фрагментах зображення має додатне значення, яке зростає пропорційно до кількості циклів навантаження. Оцінки розмірів, ПЗ зроблені на основі розрахунку автокореляційного коефіцієнта, виявились більш завадостійкими, достовірними і менш чутливим до зміни умов експерименту.

ВИСНОВКИ

Запропоновано і описано схему реєстрації та алгоритм обробки спекл-зображень для оцінки просторових розмірів ПЗ за зміною шорсткості поверхні. Проведено експериментальну апробацію запропонованого алгоритму і порівняння з відомими способами обробки під час досліджень механізмів втомного руйнування компактних зразків конструкційних матеріалів. Запропонований алгоритм виявився більш завадостійким і дає змогу проводити кількісну оцінку зміни шорсткості поверхні після встановлення відповідних калібрувальних залежностей.

1. *Ахметзянов М. Х., Аблаут Г. Н., Барышников В. Н.* Изучение больших пластических деформаций в металлах методом фотоупругих покрытий // Збірник "Оцінка і обґрунтування подовження ресурсу елементів конструкцій. Матеріали конференції Ресурс-2000". – К., 2000. – Т. 1. – С. 437–443.
2. *Дель Г. Д., Новиков Н. А.* Метод делительных сеток. – М.: Машиностроение, 1979. – 144 с.
3. *Красовский А. Я.* Хрупкость металлов при низких температурах. – К: Наук. думка, 1980. – 337 с.
4. *Визначення розміру втомної зони передруйнування методом фазозсувної інтерферометрії / О. П. Остап, Л. І. Муравський, Т. І. Вороняк та ін.* // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – № 6. – С. 61–67.
5. *Островский Ю. И.* Голография и ее применение. – М.: Наука, 1973. – 269 с.
6. *Панасюк В. В., Іваницький Я. Л., Максименко О. П.* Аналіз пружно-пластичного деформування матеріалу зони передруйнування // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – № 5. – С. 67–72.
7. *Диагностика материалов оптико-телевизионными методами / В. И. Сырмакин, Е. П. Сачочкин, Д. В. Саньков и др.* // Вестник Томского государственн. ун-та. – 2007. – № 301. – С. 101–107.
8. *Chao Y. J., Luo P. F. and Kalthoff J. F.* An experimental study of the deformation fields around a propagation crack tip // *Experimental Mechanics*. – 1998. – **38**, № 2 – P. 79–85.
9. *Dai Y. Z., Tay C. J. Chiang F. P.* Determination of the plastic zone by laser-speckle correlation // *Experimental Mechanics*. – 1991. – **31**, № 4. – P. 348–352.
10. *Dainty J. C., Wolf E.* The statistics of speckle patterns/ *Progress in Optics*. – North-Holland, 1976. – Vol. XIV. – P. 1–46.
11. *Fatigue Damage Accumulation around a Notch Using a Digital Image Measurement System / F. V. Díaz, A. F. Armas, G. H. Kaufmann, G. E. Galizzi* // *Experimental Mechanics*. – 2004. – **44**, № 3. – P. 241–246.
12. *Steckenrider J. S., Wagner J. W.* Computed Speckle Decorrelation (CSD) for the Study of Fatigue Damage // *Optics and Lasers in Engineering*. – 1995. – № 22. – P. 3–15.
13. *Thomson P. F. and Sharer B. V.* The Roughening of Free Surface During Plastic Working // *Int. J. Mach. Tool Des. Res.* – 1982. – **22**, № 4. – P. 261–264.
14. *X-ray Dynamical Defectoscopy: a Way to Study Damage Processes / D. Vavrik, J. Jakubek, J. Visschers, S. Pospisil, J. Zemankova* // *Proc. 14th European Conf. on Fracture "ECF-14"*. – Poland, Cracow, 8–13 September 2002. – P. 485–494.