

УДК 539.375 : 681.7

ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРА ФІЛЬТРА ДРОБОВОГО СТЕПЕНЯ У КОРЕЛЯЦІЙНІЙ ФУНКЦІЇ ДЛЯ АНАЛІЗУ СПЕКЛ-ЗОБРАЖЕНЬ

І. Голинський, Л. Муравський, Т. Половинко

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України
вул. Наукова, 5а, Львів, Україна
polovynkot@mail.ru

Досліджено поверхневі деформації композитних матеріалів під дією статичного навантаження за допомогою методу цифрової спекл-кореляції. Оптимізовано метод обчислення показника фільтра дробового степеня у кореляційній функції, що використовують для аналізу спекл-зображень. Отримано залежності питомої інтенсивності та усередненого переміщення \bar{d} від параметра фільтра дробового степеня α .

Ключові слова: цифрова спекл-кореляція, композитні матеріали, поле переміщень, поле деформацій, параметр фільтра дробового степеня.

Розвиток машинобудування, літакобудування та інших галузей промисловості нерозривно пов'язаний з використанням композитних матеріалів у деталях машин та елементах конструкцій. Сьогодні є велика кількість контактних та безконтактних методів діагностики матеріалів. Серед оптичних методів безконтактної діагностики поверхонь матеріалів достатньо прецизійним, оперативним і водночас простим у технічній реалізації вважають метод цифрової спекл-кореляції (ЦСК) [1–4]. У цьому методі спекл-зображення до і після навантаження зразка розбивають на прямокутні елементи $s_{m,n}$ і $r_{m,n}$, відповідно. За розробленими алгоритмом і програмою [1] формується ґратка крос-кореляційних піків, положення яких відповідає розміщенню центрів зміщених фрагментів $s_{m,n}$. На підставі отриманої ґратки крос-кореляційних піків визначають вектор переміщення $\bar{d}_{m,n}$ кожного фрагмента $s_{m,n}$ щодо відповідного фрагмента $r_{m,n}$ з тією ж нумерацією, що і фрагмент $r_{m,n}$. Описану вище процедуру повторюють для кожного спекл-зображення деформованої поверхні. Функцію кореляції $C(k,l)$ обчислюють згідно з формулою [5]

$$c'_{m,n}(k,l) = F_d^{-1} \{ R_{m,n}(p,q) S_{m,n}^*(p,q) \}, \quad (1)$$

де $R_{m,n}(p,q) = F_d \{ r_{m,n}(i,j) \}$; $S_{m,n}(p,q) = F_d \{ s_{m,n}(i,j) \}$; F_d і F_d^{-1} – оператори прямого і зворотного дискретного двовимірного перетворення Фур'є; $p = 1, \dots, P$; $q = 1, \dots, Q$ – відліки функцій $R_{m,n}$ і $S_{m,n}$ у фур'є-області.

Щоб підвищити точність визначення кореляційного піка, виконували фільтрування спільного спектра $R_{m,n}(p,q)S_{m,n}^*(p,q)$ двох вхідних фрагментів. Для цього використовували фільтр дробового степеня, запропонований у [1, 6, 7]. Такий фільтр дає змогу звузити кореляційний пік шляхом підсилення високочастотних складових спектра сигналу і так підвищити співвідношення сигнал/шум. Вихідний кореляційний сигнал $c'_{m,n}(k,l)$ у цьому випадку можна записати у вигляді [1, 9]

$$c'_{m,n}(k,l) = F_d^{-1} \left\{ \frac{R_{m,n}(p,q)S_{m,n}^*(p,q)}{\left[R_{m,n}(p,q)S_{m,n}^*(p,q) \right]^{1-\alpha}} \right\}, \quad (2)$$

де α – параметр фільтра, що набуває лише дійсних значень.

Однак цей фільтр має той недолік, що він впливає на вхідний сигнал. Це виявляється, зокрема, в тому, що підсилюються високочастотні шуми, унаслідок чого знижується точність визначення положення піка. У літературі нема даних про належне обґрунтування оптимального значення параметра фільтра, тому α вибирали без належного обґрунтування. З огляду на це, на підставі досліджень поверхневих деформацій композитних матеріалів під дією статичного навантаження методом ЦСК оптимізовано метод обчислення значень показника фільтра дробового степеня у кореляційній функції.

Визначення параметра фільтра дробового степеня α . Положення кореляційного піка в кореляційній функції (2) шукали за допомогою програми, блок-схема якої показана на рис. 1. Ця програма написана мовою програмування Delphi.

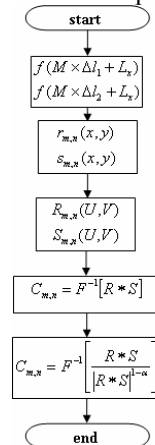


Рис. 1. Блок-схема програми визначення положення піка вихідного кореляційного сигналу

Аналіз формули (2) засвідчує, що в разі підстановки в неї значень параметра фільтра дробового степеня α , які близькі до 0, різниця співвідношення сигнал/шум набуває максимальних значень. Однак зі збільшенням різниці сигнал/шум кореляційний пік має властивість зміщуватись від свого дійсного положення. Це пов'язано з тим, що відбувається підсилення високочастотних шумів. Тому ми відшукали оптимальне значення параметра фільтра. Для цього в [1] запропоновано ввести критерій оцінки

достовірності положення кореляційного піка шляхом вимірювання значення питомої інтенсивності η за різних значень параметра фільтра α . Цей підхід враховує особливості мікроструктури поверхні досліджуваного матеріалу, умови освітлення поверхні та параметри і характеристики оптико-електронної системи реєстрації спекл-зображень.

Суть алгоритму, запропонованого в [1], полягає у визначенні екстремуму питомої інтенсивності η кореляційних піків, що формують для конкретних спекл-зображень ділянки поверхні досліджуваного зразка матеріалу залежно від значень параметра фільтра α . У цьому разі питому інтенсивність m,n -го кореляційного піка визначали за формулою

$$\eta_{m,n} = \frac{1 - (I_{m,n} - \bar{I}_s)}{I_{m,n} (\Delta p)_{m,n}}, \quad (3)$$

де $I_{m,n}$ – зведена інтенсивність максимуму m,n -го кореляційного піка; \bar{I}_s – середня зведена інтенсивність відліків шуму, що оточують m,n -й кореляційний пік; $(\Delta p)_{m,n}$ – кількість пік селів, які відповідають півширині m,n -го кореляційного піка.

На рис. 2 зображено експериментальну залежність питомої інтенсивності η від параметра фільтра α спекл-зображення ділянки поверхні ПКМ, армованого коротким скловолокном. Ця залежність засвідчує, що максимальне значення η досягне при $0,40 \leq \alpha \leq 0,65$. Запропонований алгоритм вибору оптимального параметра фільтра α дає змогу знайти оптимальне значення цього параметра, яке для заданого випадку становить $\eta = 0,5$.

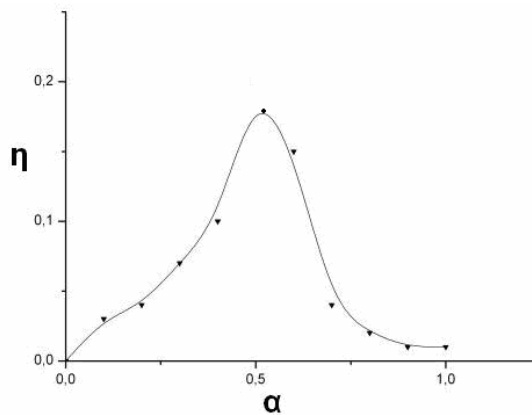


Рис. 2. Залежність питомої інтенсивності η від параметра фільтра дробового степеня α для спекл-зображення ділянки поверхні ПКМ

Однак описаний вище метод ґрунтується на загальновідомих співвідношеннях визначення питомої потужності випромінювання і потребує експериментального підтвердження. Тому ми запропонували інший підхід для визначення параметра α . Він ґрунтується на крос-кореляції двох спекл-зображень з попередньо заданим кроком переміщення одного зображення щодо іншого. Як вихідне використовуємо реальне спекл-зображення поверхні композитного матеріалу (рис. 3), отримане експериментально. Розмірність S цього спекл-зображення

$$S = M \times L, \quad (4)$$

де M – розмірність спекл-зображення по осі y , $L = (\Delta l_1 + L_x + \Delta l_2)$ – розмірність спекл-зображення по осі x . В останньому виразі прийнято, що L_x є сталою величиною, $\Delta l_1 = \Delta l_2$ – зміщення одного фрагмента щодо іншого.

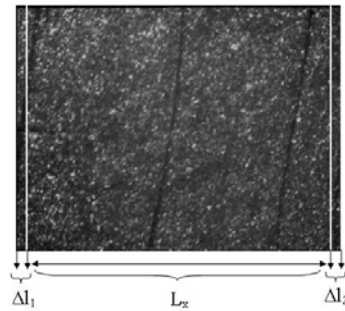


Рис. 3. Спекл-зображення поверхні ПКМ

Надалі з отриманих фрагментів ($M \times \Delta l_1$), ($M \times L_x$), та ($M \times \Delta l_2$) формують два спекл-зображення. Перше спекл-зображення матиме розмірність ($M \times \Delta l_1 + L_x$) і відповідатиме поверхні в ненавантаженому стані (рис. 4, а). Друге зображення (див. рис. 4, б) матиме розмірність ($M \times L_x + \Delta l_2$), і відповідатиме поверхні, до якої прикладали навантаження.

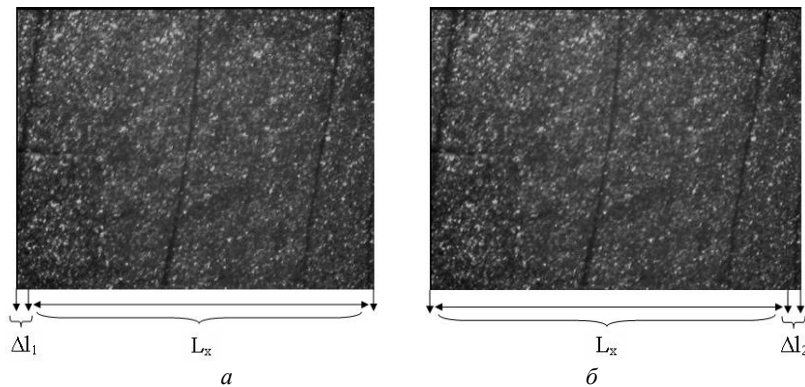


Рис. 4. Змодельовані спекл-зображення ПКМ

Після цього виконують крос-кореляцію змодельованих на рис. 3, а та б зображень. Крос-кореляцію проводили за допомогою спеціально розробленої програми в середовищі Delphi. У підсумку побудовано графічну залежність усередненого переміщення \bar{d} кореляційного піка від параметра фільтра α . З отриманої залежності знаходимо, що оптимальне значення переміщення \bar{d} відповідає $\alpha = 0,5$ (рис. 5). Порівняння рис. 2 і 5 засвідчує, що в обох випадках оптимальні значення α однакові.

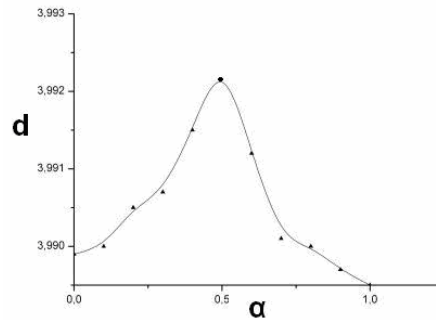


Рис. 5. Залежність усередненого переміщення \bar{d} від параметра фільтра дробового степеня α для спекл-зображення ділянки поверхні ПКМ

Отже, запропоновано новий підхід для обчислення значення параметра фільтра дробового степеня, який полягає у крос-кореляції тестових зображень з певним заданим кроком переміщення. За допомогою цього методу отримано, що оптимальне значення параметра фільтра дробового степеня для полімерних композитних матеріалів $\alpha=0,5$. Отримані результати дають змогу підвищити точність визначення поверхневих переміщень полімерних композитних матеріалів.

1. Муравський Л. І., Гвоздюк М. М., Половинко Т. І. Визначення поверхневих деформацій композитів методами цифрової спекл-кореляції. Фіз.-хім. механіка матеріалів. 2007. Т. 43. № 4. С. 103–107.
2. Панасюк В. В., Іваницький Я. Л., Максименко О. П. Аналіз пружно-пластичного деформування матеріалу зони передруйнування // Фіз.-хім. механіка матеріалів. 2004. № 5. С. 1–6.
3. Geers M.G.D., Borst de R., Peijs T. Mixed numerical-experimental identification of non-local characteristics of random-fibre-reinforced composites // Composites Science and Technology, 1999. Vol. 59. P. 1569–1578.
4. Perie J.-N., Calloch S., Cluzel C., Hild F. Analysis of a multiaxial test on a C/C composite by using digital image correlation and a damage model // Exp. Mechanics, 2002. Vol. 42. N 3. P. 318–328.
5. Broggiato G.B., Newaz G.M., Amodio D. Application of digital speckle correlation for strain measurement in composites // Key Engineering Materials, 2002. P. 221–222, 337–346.
6. Chen J., Li J., Qin Y., Liu B. Digital image correlation for mechanical behavior of viscoelastic materials, SPIEProc. 2003. 5058. P. 543–547.
7. Vijaya Kumar B.V.K., Hassebrook L. Performance measures for correlation filters // Appl. Opt. 1990. Vol. 29. N 20. P. 2997–3006.

**TECHNIQUE OPTIMIZATION FOR DETERMINING PARAMETER OF
FRACTIONAL POWER FILTER INVOLVED IN THE CORRELATION FUNCTION
FOR SPECKLE IMAGE ANALYSIS**

I. Golytsky, L. Muravsky and T. Polovynko

*G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine
5A Naukova St., Lviv, Ukraine
polovynkot@mail.ru*

In this work the surface strains appearing in composite materials under static loads have been studied, using a speckle correlation technique. We have optimized a method for calculating the index of fractional-power filter involved in the correlation function utilized when analyzing speckle images. The dependences of specific intensity and averaged displacement \bar{d} on the α parameter of the fractional-power filter have been derived.

Key words: digital speckle-correlation, composite materials, displacement field, strain field, parameter of fractional-power filter.

**ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРА ФИЛЬТРА
ДРОБНОЙ СТЕПЕНИ В КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ АНАЛИЗА
СПЕКЛ-ИЗОБРАЖЕНИЙ**

И. Голинский, Л. Муравский, Т. Половинко

*Физико-механический институт им. Г.В. Карпенко НАН Украины
ул. Научная, 5а, Львов, Украина
polovynkot@mail.ru*

Исследованы поверхностные деформации композитных материалов под действием статичной нагрузки с помощью метода цифровой спекл-корреляции. Оптимизирован метод вычисления показателя фильтра дробной степени в корреляционной функции, используемой для анализа спекл-изображений. Получены зависимости удельной интенсивности и усредненного перемещения \bar{d} от параметра фильтра дробной степени α .

Ключевые слова: цифровая спекл-корреляция, композитные материалы, поле перемещений, поле деформаций, параметр фильтра дробной степени.

Стаття надійшла до редколегії 15.04.2009

Прийнята до друку 30.06.2009