

УДК 539.375:681.7

## ЗНАХОДЖЕННЯ J-ІНТЕГРАЛА МЕТОДОМ ЦИФРОВОЇ СПЕКЛ-КОРЕЛЯЦІЇ ДЛЯ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

Т. Половинко, Л. Муравський

*Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України,  
Наукова 5а, Львів, Україна*

Досліджено поверхневі деформації в ділянці концентратора напружень методом цифрової спекл-кореляції під дією статичного навантаження. Побудовано поля переміщень та поля деформацій у ділянці концентратора напружень, а також графічні залежності J-інтеграла від довжини тріщини.

*Ключові слова:* цифрова спекл-кореляція, J-інтеграл, композитні матеріали, поля переміщень, поля деформацій.

Серед сучасних конструктивних матеріалів на теперішньому етапі практичного використання, найперспективнішими є композитні матеріали. Вони складаються з двох або більше компонентів, що мають різні механічні властивості. Правильний вибір співвідношення і структури композита дає змогу отримати матеріали з необхідними наперед заданими властивостями. Для вивчення їхніх властивостей необхідно детально дослідити багато різних параметрів, оскільки композитні матеріали мають не тільки позитивні, й негативні властивості компонентів, з яких складаються. На сучасному етапі розвитку науки про міцність матеріалів і конструкцій значну увагу приділяють вивченню механіки їхнього руйнування [1, 3]. Останніми роками багато наукових досліджень присвячено вивченню полімерних композитних матеріалів (ПКМ) в околі дефектів типу тріщин у їхній структурі та розробці нових методик досліджень дефектності цих матеріалів [4-5]. Припустимо, що зона пластичності у ПКМ при вершині тріщини настільки мала, що для її опису можна застосувати теорію пружності. Якщо це так, то пластичні деформації при вершині тріщини не впливають на інтенсивність виділення енергії, яка визначена полем напружень. У літературі її прийнято позначати літерою  $G$  [7].

Для того, щоб з високою точністю вирахувати вплив пластичних деформацій на величину  $G$ , необхідно отримати точний розв'язок пружної задачі поля напружень при вершині тріщини. Такий розв'язок задачі сьогодні ще не отриманий. Однак існує непрямий спрощений метод аналізу деформацій, в основі якого є обчислення J-інтеграла. Він записується у вигляді [7]

$$J = \int_{\Gamma} \left( W dy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds \right), \quad (1)$$

- де  $\Gamma$  - замкнутий контур, який оточує в напруженому твердому тілі певну ділянку і який обходять проти годинникової стрілки;  $T$  - вектор напруження, перпендикулярний до контуру  $\Gamma$  і напрямлений у зовнішній бік;  $T_{ij} = \sigma_{ij} n_{ij}$ ;  $u$  - переміщення в напрямі осі  $x$ ;  $ds$  - елемент контуру  $\Gamma$ . Енергія деформацій одиниці об'єму

$$W = W(x, y) = W(\varepsilon) = \int_0^{\varepsilon} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}. \quad (2)$$

$J$ -інтеграл можна вважати мірою інтенсивності поля напруження-деформації біля вершини тріщини і в спрощеному вигляді його записати [7] так:

$$J = \eta \frac{U}{B(K - a)} \quad (3)$$

- де  $K$  - ширина зразка;  $a$  - довжина тріщини;  $B$  - товщина зразка,  $U$  - площа під кривою навантаження,

$$U = \int_0^{\delta_1} P(\delta) d\delta, \quad (4)$$

-  $\eta$  - функція форми, яку записують у вигляді

$$\eta = \sqrt{1 + \left(\frac{a}{W - a}\right)^2} - \frac{a}{W - a}. \quad (5)$$

Для знаходження  $J$ -інтеграла проведено дослідження, суть яких полягала у контролі процесу деформування поверхні шаруватого композита в околі вершини концентратора напружень шляхом реєстрування спекл-зображень ділянки поверхні зразка. Методика подібних досліджень детально описана в [2 - 4]. У процесі експерименту, у захоплювачах універсальної розривної машини FPZ-10/1 закріплювали плоский зразок, який навантажували одновісним розтягом. Досліджуваний шаруватий композитний матеріал мав розмірами  $10 \times 210$  мм<sup>2</sup>. Його вирізали з листового тришарового матеріалу, у якого зовнішніми шарами були алюмінієві пластини товщиною 1 мм. Як заповнювач, який забезпечував спільну роботу зовнішніх шарів, використовували епоксидно-фенольний пластик типу ЕФ-32, армований дисперсними частинками (скляні кульки діаметром 0,2 мм). Вміст арматури становив 30%. Товщина тришарового пакета дорівнювала 4,0 мм. По центру зразка наносили тонкий надріз шириною 0,25 мм і довжиною 20 мм під кутом  $\alpha = 90^\circ$  до лінії розтягу. Загальний вигляд шаруватого композитного матеріалу, закріпленого в кінцевиках універсальної розривної машини FPZ-10/1, показано на рис. 1.



Рис. 1. Загальний вигляд шаруватого композитного матеріалу, закріпленого в кінцєвиках універсальної розривної машини FPZ-10/1

Навантаження до зразка шаруватого композитного матеріалу (ШКМ) прикладали в межах від 0 до 600 кГ з кроком 25 кГ. Світло від лазера Л падало на поверхню ШКМ, схема експериментальної установки зображена на рис. 2. Після кожного кроку навантаження за допомогою камери (ПЗЗ) реєстрували спекл-зображення ділянки поверхні зразка за допомогою цифровою камерою "PixeLINK" (ПЗЗ), що входить до складу цифрового спекл-корелятора. Дані в реальному часі заносили в комп'ютер (ПК) для подальшого опрацювання.

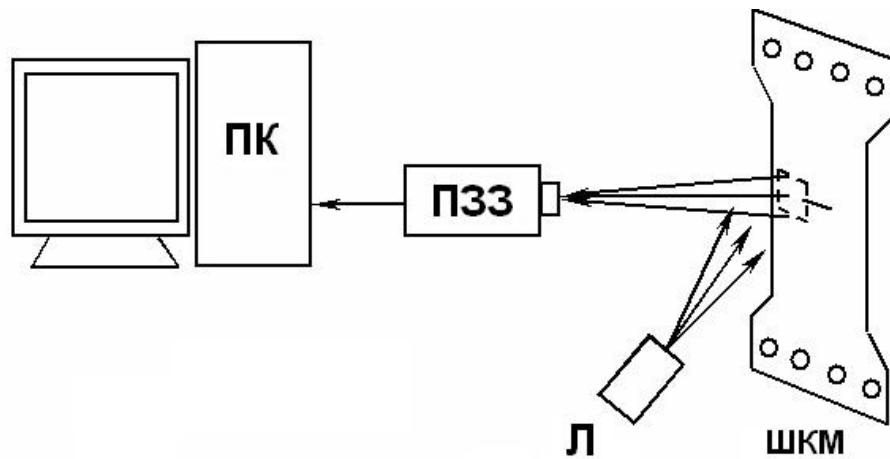


Рис. 2. Схема установки для реєстрації спекл-зображень у ділянці концентратора напружень у шаруватому композитному матеріалі.

Отримані спекл-зображення поверхні шаруватого композитного матеріалу розбивали на  $M \times N$  прямокутних фрагментів однакових розмірів ( $64 \times 64$  пікселів, розмір одного пікселя 18 мкм). Після цього виконували взаємну кореляцію фрагментів  $s_{m,n}$  (спекл-зображення навантаженого зразка) і  $r_{m,n}$  (спекл-зображення вільного зразка). Опрацьовували результати за спеціально розробленою програмою [2], яка давала змогу формувати ґратку кроскореляційних піків, положення яких відповідало розташуванню центрів зміщених фрагментів  $s_{m,n}$ . Після цього будували поля деформацій для кожної пари спекл-зображень. Як приклад, на рис. 3, показано поля деформацій поверхні ШКМ в разі навантажень  $P_i = 325 \text{ кГ} - P_{i+1} = 350 \text{ кГ}$  (а) та навантажень  $P_i = 425 \text{ кГ} - P_{i+1} = 450 \text{ кГ}$  (б).

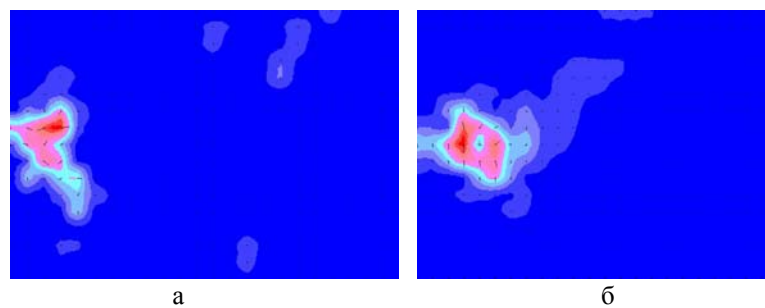


Рис. 3. Поля деформацій поверхні ШКМ за різних навантажень.

На підставі отриманих результатів, побудовано криву залежності навантаження  $F$  від деформації  $a$  для ШКМ (рис. 4.)

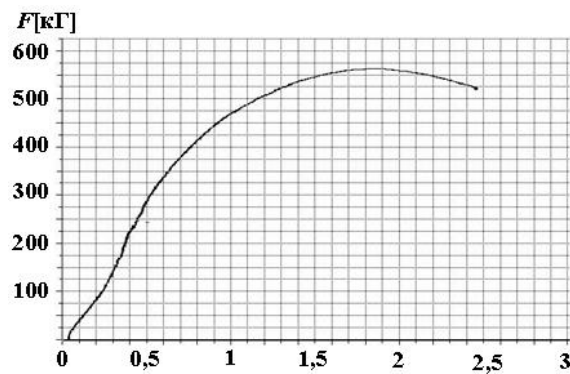


Рис. 4. Крива навантаження деформацій для ШКМ.

Далі знайдено площу під кривою навантаження-деформації  $U$ , а її підставлено значення у вираз (3) та побудовано залежність  $J$ -інтеграла від тріщини  $\Delta a$  (рис. 5).

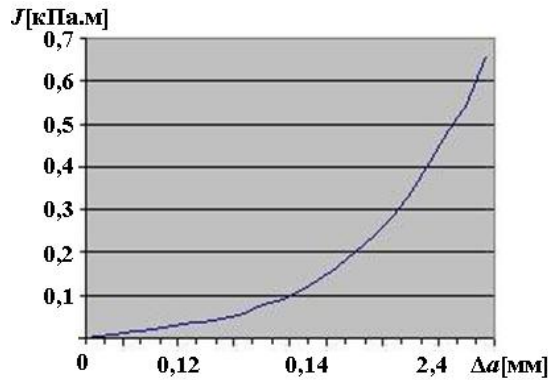


Рис. 5. Залежність  $J$ -інтеграла від тріщини.

Отже запропоновано новий підхід для визначення  $J$ -інтеграла в залежності від розміру тріщини  $\Delta a$ . З використанням методу цифрової спекл-кореляції та співвідношення (3) побудовано залежність значення  $J$ -інтеграла від  $\Delta a$  тріщини, що поширюється в процесі статичного навантаження зразка. На підставі цієї залежності можна довести, що найрізкіші зміни розмірів тріщини відбуваються при 0,2 кПа·м, а це відповідає критичному значенню поширення тріщини для ШКМ. Запропонована модель дає змогу виконати аналогічні дослідження на подібних ШКМ та визначити їхню тріщиностійкість до прикладених навантажень.

1. Панасюк В.В. Механіка квазіхрупкого руйнування матеріалів. К: Наук. думка, 1991. 416 с.
2. 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.
3. Chen J., Li J., Qin Y., Liu B. Digital image correlation for mechanical behavior of viscoelastic materials// SPIEProc., 2003. P. 543 – 547.
4. Dong X., Dai J. Study of cracked unidirectional glass fiber-reinforced composites by digital speckle correlation method. Journal of Reinforced Plastics and Composites // 2005. 24. P. 1737.
5. Geers M.G.D., Borst R., Peijs T., Mixed numerical-experimental identification of non-local characteristics of random-fibre-reinforced composites, Composites Science and Technology // 1999. 59. P. 1569 – 1578.
6. 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. 42(3). P. 318 – 328.
7. Rice, J.R. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentrations by notches and cracks // Appl. Mech, 1968. P. 379 – 386.

**DETERMINATION OF J-INTEGRAL WITH THE METHOD OF DIGITAL  
SPECKLE-CORRELATION FOR THE COMPOSITE MATERIALS****T.I. Polovynko, L.I. Muravsky***G. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute  
of National Academy of Sciences of Ukraine  
5a Naukova St., Lviv, Ukraine*

Surface deformations in the region of a strain concentrator are studied with the speckle-correlation technique under the action of static loading. The displacement and strain fields in are revealed in the region of the strain concentrator and graphical dependences of J-integral on the crack length are ascertained.

*Key words:* digital speckle-correlation, J-integral, composite materials, displacement field, strain field.

**НАХОЖДЕНИЕ J-ИНТЕГРАЛА МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ СПЕКЛ-  
КОРЕЛЯЦИИ ДЛЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ****Т. Половинко, Л. Муравский***Физико-механический институт им. Г.В.Карпенка НАН Украины,  
Научная 5а, Львов, Украина*

Исследованы поверхностные деформации в области концентратора напряжений методом цифровой спекл-корреляции под действием статической нагрузки. Построены поля деформаций в области концентратора напряжения, а также графические зависимости J-интеграла от длинны трещины

*Ключевые слова:* цифровая спекл-корреляция, J-интеграл, композитные материалы, поля перемещений, поля деформаций.

Стаття надійшла до редколегії 02.04.2010

Прийнята до друку 26.05.2010