

УДК 539.375

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДОМ ДИНАМІЧНОЇ ФОТОПРУЖНОСТІ РУЙНУВАННЯ ОРТОТРОПНОЇ ПЛАСТИНИ З КРУГОВИМ ОТВОРОМ ТА ДВОМА КРАЙОВИМИ ТРІЩИНАМИ ЗА ІМПУЛЬСНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

М. П. МАЛЕЖИК<sup>1</sup>, М. І. ПІДГУРСЬКИЙ<sup>2</sup>, Ю. А. РУДЯК<sup>3</sup>,  
Н. О. ФЕДЧИШИН<sup>3</sup>, І. М. ПІДГУРСЬКИЙ<sup>2</sup>, Л. В. ВОЙТОВИЧ<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Національний педагогічний університет ім. М. П. Драгоманова, Київ;

<sup>2</sup> Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя;

<sup>3</sup> Тернопільський державний медичний університет ім. І. Я. Горбачевського;

<sup>4</sup> Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне

Досліджено динамічне руйнування конструкційних елементів у вигляді пластин із прозорих композитів, що послаблені отвором та двома контурними симетричними тріщинами, методом динамічної фотопружності під імпульсним навантаженням. Вивчено зміни в часі коефіцієнтів інтенсивності напружень та швидкості руху вершини тріщини.

**Ключові слова:** тріщина, динамічний коефіцієнт інтенсивності напружень, динамічна фотопружність.

Елементи конструкцій сучасної техніки у вигляді пластин і оболонок зі склопластики з концентраторами напружень широко використовують у космічному авіабудуванні, будівництві, суднобудуванні, транспортному та хімічному машинобудуванні. Під впливом технологічних або експлуатаційних чинників за дії динамічних навантажень на контурах отворів у цих елементах виникають різного виду тріщини. Це суттєво знижує характеристики міцності і ресурсні можливості несучих елементів і всієї конструкції загалом. Конкретні результати про динамічну поведінку пружних пластин, послаблених отворами, наведені раніше [1–4]. Проаналізовано також [5–9] напружено-деформований стан пластин з тріщиною під час довготривалого статичного навантаження.

**Визначення динамічних коефіцієнтів інтенсивності напружень поляризаційно-оптичним методом.** Через динамічний характер навантаження і поширення тріщини необхідно враховувати сили інерції, тобто розглядати динамічну задачу теорії пружності для тіла з рухомою тріщиною, яку складно розв'язати і експериментально досліджувати швидкоплинні процеси.

Важливо під час математичного опису поширення тріщини виявити загальні закономірності розподілу полів напружень і переміщень на поверхнях її вершини. Більшість дослідників на основі теоретичного аналізу зробили висновок про залежність напруженого стану, а отже, коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН) від швидкості поширення тріщини. Виявили [10], що якщо вершина тріщини переміщується уздовж деякої гладкої кривої з довільною швидкістю, то в локальній системі координат, зв'язаній з вершиною (рис. 1а), кутовий розподіл напружень залежить саме від швидкості руху цієї вершини.

Компоненти тензора напружень за нормального відриву мають вигляд [11]

Контактна особа: Ю. А. РУДЯК, e-mail: rjdjaka@tdmu.edu.ua

$$\sigma_{xx} = \frac{K(t)}{\sqrt{2\pi r}} \Phi_{xx}(\theta, \nu) + O(1); \quad \sigma_{yy} = \frac{K(t)}{\sqrt{2\pi r}} \Phi_{yy}(\theta, \nu) + O(1);$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K(t)}{\sqrt{2\pi r}} \Phi_{xy}(\theta, \nu) + O(1), \quad (1)$$

де  $\nu$  – швидкість поширення тріщини;  $r, \theta$  – рухомі полярні координати з миттєвим центром у вершині тріщини;  $K(t)$  – динамічний КІН, який визначають, як і за стаціонарної тріщини, за допомогою граничного співвідношення

$$K(t) = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \cdot \sigma_{yy}(r, \theta, t). \quad (2)$$

Звідси маємо функції, що залежать від полярного кута  $\theta$  і швидкості росту тріщини  $\nu$ :

$$\Phi_{xx}(\theta, \nu) = \frac{(1 + \delta_1^2)r_1^{1/2}}{R(\delta_1, \delta_2)} \left[ \left(1 + 2\delta_1^2 - \delta_2^2\right) \frac{\cos(\theta/2)}{r_1^{1/2}} - \frac{4\delta_1\delta_2 \cos(\theta/2)}{(1 + \delta_2^2)r_1^{1/2}} \right];$$

$$\Phi_{yy}(\theta, \nu) = \frac{(1 + \delta_2^2)r_2^{1/2}}{R(\delta_1, \delta_2)} \left[ \left(1 + \delta_2^2\right) \frac{\cos(\theta/2)}{r_2^{1/2}} + \frac{4\delta_1\delta_2 \cos(\theta/2)}{(1 + \delta_2^2)r_2^{1/2}} \right]; \quad (3)$$

$$\Phi_{xy}(\theta, \nu) = \frac{2(1 + \delta_2^2)\delta_1 r_1^{1/2}}{R(\delta_1, \delta_2)} \left( \frac{\sin(\theta_1/2)}{r_1^{1/2}} - \frac{\sin(\theta_2/2)}{r_2^{1/2}} \right),$$

де  $\delta_{1,2}^2 = 1 - \gamma^2 / c_{1,2}^2$ ;  $r_1 \cdot e^{i\theta} = x + \delta_1 y$ ;  $r_2 \cdot e^{i\theta} = x + \delta_2 y$ ;  $c_1$  і  $c_2$  – швидкості поздовжніх і поперечних хвиль;  $R(\delta_1, \delta_2) = 4\delta_1\delta_2(1 + \delta_2^2)^2$  – функція Релея.

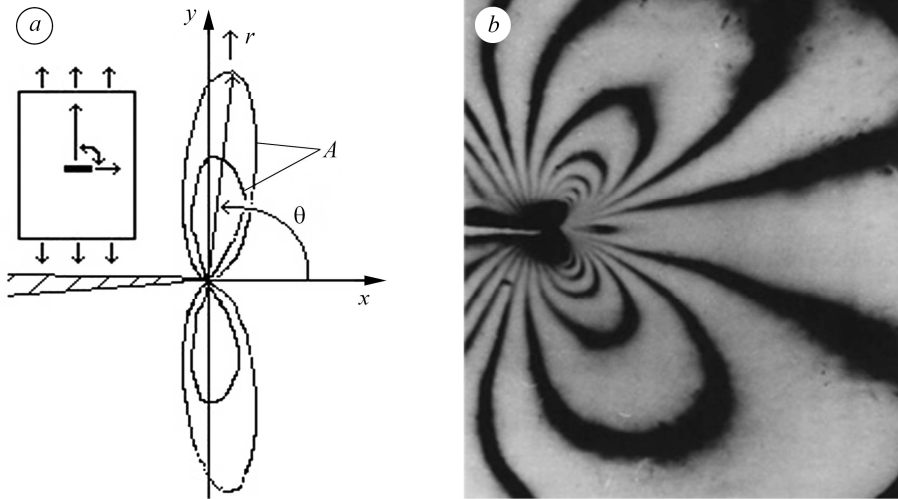


Рис. 1. Система координат (а) та картини ізохром (b) біля вершини тріщини (A – смуги).

Fig. 1. Coordinate system (a) and pictures of isochromes (b) at the crack tip (A – fringes).

Використовуючи дані для епоксидної смоли ЕД-20 МА і співвідношення (1), отримали залежність  $\Phi_{yy}(\nu)$ . Результати досліджень полів ізохром у фіксовані моменти часу за одних і тих же збільшень довжин тріщин, які поширюються в розтягнутій пластині (рис. 1b), вказують на збіг головних напрямків тензора напружень і деформацій, оскільки не залежать від характеру навантаження і швидкості поширення вершини тріщини [12].

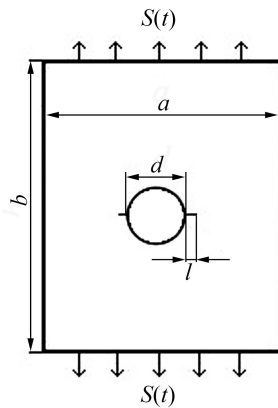


Рис. 2. Схема навантаження пластини.

Fig. 2. Scheme of the plate load.

Випробовували пластини зі склопластиків на основі епоксидної смоли ЕД-20 МА. Технологія виготовлення таких матеріалів і методики дослідження їх механічних і оптичних властивостей відомі [13]. Випробовували зразки у вигляді пластин з круговими отворами діаметром  $d$  і симетричними тріщинами завдовжки  $l$ , що орієнтовані у напрямку горизонтального діаметра отвору, який збігається з головним напрямом ортотропії (рис. 2).

Для вивчення хвильових полів та кінетики росту тріщин у конструкційно-анізотропних матеріалах використовували поляризаційно-динамічну установку. Виникнення і розвиток напруженого стану в околі вершини тріщини фіксували за інтерференційними смугами. Розміри пластини такі:  $a = 100$  mm;  $b = 140$  mm;  $d = 16$  mm;  $l = 6$  mm. Навантажували зразки імпульсом розтягу  $S(t)$  з часом наростання  $\tau = 30$   $\mu$ s електромагнетним індуктором [10].

**Результати та обговорення.** З аналізу кінограм, отриманих на поляризаційно-динамічній установці, виявили [10], що ізохроми поблизу вершин симетрично розміщених тріщин формуються синхронно. При цьому їх петлі біля рухомих вершин симетричні відносно площини тріщин. Якщо  $\theta = \pi/2$ , найближчі до вершин ізохроми досягають максимуму.

З надходженням фронту хвилі коефіцієнт  $K(t)$  в обох вершинах тріщин починає зростати. Максимальне значення динамічного КІН зафіксували перед зрушенням тріщин:  $K = (3...5)K_c$ . Енергія заряду конденсатора, за якої протікало руйнування, не перевищувала  $W = 4,25$  kJ. Початок руху тріщин і їх подальший розвиток до повного руйнування моделі відбувались одночасно. Виявили (рис. 3), що на початку проміжку старт–вихід до вільного контуру моделі тріщина рухається зі швидкістю до 450 m/s, а далі зупиняється на 3...4  $\mu$ s.

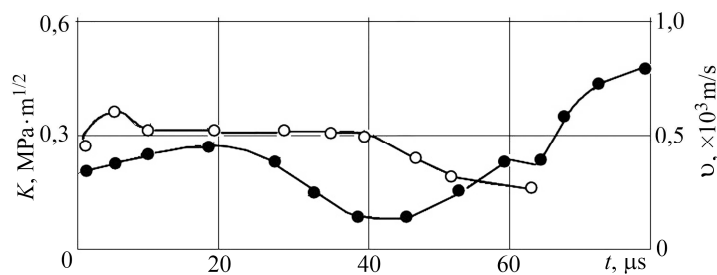


Рис. 3. Залежність швидкості руху вершини тріщини  $v$  (●) і коефіцієнта інтенсивності напружень  $K$  (○) від часу  $t$ .

Fig. 3. Change of the speed of the crack tip  $v$  (●) and stress intensity factor  $K$  (○) with the time  $t$ .

До виходу вершини тріщини на вільний контур швидкість підвищувалася і досягала 750...800 m/s, а КІН змінювався плавніше. Максимальне його значення становило  $0,36$   $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ . Важливо, що локалізовані перехідні напруження та деформації тіл за імпульсних навантажень не фіксували, оскільки тут руйнування може виникати в одній частині зразка незалежно від інших.

### ВИСНОВКИ

Аналіз отриманих результатів дає можливість стверджувати, що тріщини розвиваються за основним законом руху квазікрихкої тріщини, тобто завжди ру-

хаються перпендикулярно до напрямку максимального розтягального напруження, що виникає в даний момент у вершині тріщини. Виявлено суттєву різницю між руйнуванням пластин під імпульсним і статичним навантаженнями ( $K = (3 \dots 5)K_c$ ). За імпульсних неможливі локалізовані перехідні напруження і деформації. Тут руйнування може виникати в одній частині пластини, незалежно від інших.

*РЕЗЮМЕ.* Исследовано динамическое разрушение конструкционных элементов в виде пластин из прозрачных композитов, ослабленных отверстием и двумя контурными симметричными трещинами, методом динамической фотоупругости при импульсной нагрузке. Изучены изменения во времени коэффициентов интенсивности напряжений и скорости движения вершины трещины.

*SUMMARY.* The process of dynamic fracture of structural elements in the form of plates of transparent composites weakened by a hole and two symmetrical contour cracks is investigated using the method of dynamic photoelasticity under pulse load. The changes of the stress intensity factors and the crack tip propagation velocity are studied.

1. Зирка А. И., Малезжик М. П., Чернышенко И. С. О концентрации напряжений в ортотропной пластине с круговым отверстием при динамическом нагружении // Прикл. механика. – 2004. – **40**, № 2. – С. 128–133.
2. Малезжик М. П., Кузнецова О. П., Мусияченко А. В. Исследование динамики разрушения отдельных конструкционных элементов поляризационно-оптическим методом // Проблемы прочности. – 1991. – № 9. – С. 46–48.
3. Зирка А. И., Малезжик М. П., Чернышенко И. С. О распределении напряжений в ортотропной пластине с круговыми отверстиями при импульсном нагружении // Прикл. механика. – 2004. – **40**, № 4. – С. 102–106.
4. О волновом поле напряжений возле границы с разрезом в анизотропных пластинах при импульсном нагружении / А. И. Зирка, М. П. Малезжик, И. С. Чернышенко, Г. П. Шеремет // Прикл. механика. – 2004. – **40**, № 8. – С. 131–137.
5. Каминский А. А., Гаврилов Д. А. Длительное разрушение полимерных и композитных материалов с трещинами. – К.: Наук. думка, 1992. – 240 с.
6. Рудяк Ю., Пидгурский Н. Оптические методы механики твердого тела. – Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 128 s.
7. Voitovich L. V., Malezhik M. P., and Chernyshenko I. S. Photoelastic modeling of the fracture of viscoelastic orthotropic plates with a crack // Int. Appl. Mech. – 2010. – **46**, № 6. – P. 677–682.
8. Voitovich L. V., Malezhik M. P., and Chernyshenko I. S. Stress state around cracks on the boundary of a hole in a photoelastic orthotropic plate under creep // Int. Appl. Mech. – 2011. – **46**, № 11. – P. 1268–1274.
9. Malezhik M. P. and Voitovich L. V. Photoelastic modeling of problems in the mechanics of orthotropic bodies // Int. Appl. Mech. – 2014. – **50**, № 6. – P. 699–705.
10. Малезжик М. П. Динамічна фотопружність анізотропних тіл. – К.: ІГФ НАН України ім. С. І. Субботіна, 2001. – 200 с.
11. Партон В. З., Борисковский В. Г. Динамическая механика разрушения. – М.: Машиностроение, 1985. – 264 с.
12. Исследование волновых полей в упругих пластинах с концентраторами напряжений методом динамической фотоупругости / М. П. Малезжик, О. П. Малезжик, А. И. Зирка, И. С. Чернышенко // Прикл. механика. – 2005. – **41**, № 12. – С. 84–92.
13. Малезжик М. П. Оптично-чутливі матеріали для моделювання хвильових полів напружень в анізотропних тілах // Фіз. хім. механіка матеріалів. – 2004. – **40**, № 1. – С. 99–103. (Malezhik M. P. Optically sensitive materials for the simulation of wave fields of stresses in anisotropic bodies // Materials Science. – 2004. – **40**, № 1. – P. 118–124.)

Одержано 21.06.2016