

УДК 539.375: 687.7

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ ОДНОНАПРАВЛЕНИХ СКЛОПЛАСТИКІВ

М. М. ГВОЗДЮК¹, О. В. ГЕМБАРА¹, В. М. БОЛЕЙЧУК²

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Тернопільський національний економічний університет

Визначено характеристики тріщиностійкості тонколистових ортотропних полімерних композиційних матеріалів за побудованими методом цифрової кореляції спекл-зображеннями полів переміщень та деформацій у зоні передруйнування. Встановлено, що за складного напруженого стану енергія руйнування та критичні напруження волокнистих однонаправлених композитів залежать від кута орієнтації надрізу до напрямку армування.

Ключові слова: ортотропні полімерні композиційні матеріали, розподіл деформацій, енергія руйнування, критичні напруження.

Полімерні волокнисті композиційні матеріали (ВКМ) широко застосовують у ракетно-космічній та авіаційній техніці, а також в інших галузях машинобудування. Із них виготовляють деталі і конструктивні елементи відповідального призначення, оскільки вони володіють високою міцністю, пружністю, термо- та ерозійною тривкістю.

Неметалічні ВКМ складаються із шарів армувальних волокон, жорстко з'єднаних полімерною матрицею, що породжує анізотропію їх фізико-механічних властивостей. Тому важливо вивчити закономірності руйнування анізотропних матеріалів, зокрема ортотропних композитів, щоб удосконалити технологію створення нових конструкційних матеріалів із наперед заданими властивостями. Застосування силових підходів лінійної механіки руйнування (ЛМР) тут досить проблематичне не тільки через анізотропію та неоднорідність структури таких матеріалів, але й через здатність окремих компонентів до пластичної деформації. Крім того, механізми виникнення пошкоджень в них дещо інші, ніж в однорідних ізотропних матеріалах. Отже, необхідно обґрунтувати можливість застосування підходів ЛМР для оцінки напружено-деформованого стану та визначення параметрів тріщиностійкості ортотропних композитів.

Матеріали, зразки та методика досліджень. Запропонований раніше [1, 2] теоретико-експериментальний підхід використано для визначення енергії руйнування та критичних напружень для двох типів тонколистових ортотропних склопластиків ЕФ 32-301 та 27-63С, армованих неперервним скловолокном із об'ємним вмістом арматури $V_f = 30\%$. Перший виготовлений на основі епоксидіанової смоли Е-40, армованої скловолокном НПС 10/200, другий складається з епокси-фенольної матриці ЕТФ-10, армованої алюмоборосилікатним скловолокном типу БС-6. Побудовано діаграми розтягу та зсуву плоских зразків з цих матеріалів без надрізу [3, 4].

Із пластин напівфабрикатів вирізали плоскі зразки розміром $2 \times 30 \times 150$ mm із центральним надрізом для випробувань розтягом. У них фрезою товщиною 0,2 mm створювали надріз, кут α нахилу якого до напрямку армування композиту

Контактна особа: О. В. ГЕМБАРА, e-mail: hembra@ipm.lviv.ua

(головної осі ортотропії), що збігається з лінією дії розтягального зусилля, становив 15° ; 30° ; 45° ; 60° ; 75° та 90° (рис. 1).



Рис. 1. Загальний вигляд зразків зі склопластиків ЕФ 32-301 (а) і 27-63С (b).

Fig. 1. A general view of glass plastic specimens: ЕФ 32-301 (a) and 27-63C (b).

Результати та обговорення. Під час розтягу зразків з надрізом ($\alpha = 90^\circ$) методом цифрової спекл-кореляції (ЦСК) [5] встановили оптимальну базу вимірювання b еквівалентної деформації біля вершини надрізу, яка для цих матеріалів знаходиться у межах $0,5 \dots 1,5$ mm (рис. 2).

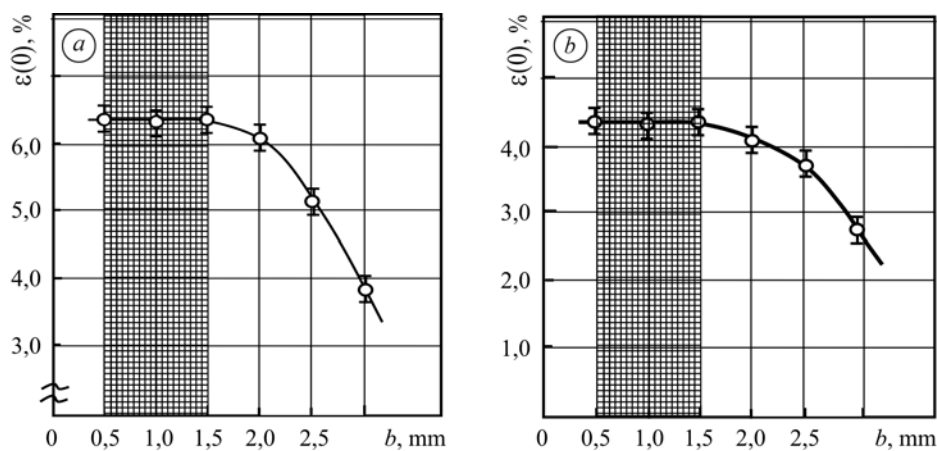


Рис. 2. Залежність деформації склопластиків ЕФ 32-301 (а) і 27-63С (b) від бази вимірювання.

Fig. 2. Dependence of deformation of ЕФ 32-301 (a) and 27-63C (b) glass plastics on measuring base.

Визначали вплив об'ємного вмісту арматури V_f , який пов'язаний з віддалю між армувальними волокнами, на розподіл деформацій біля концентратора напружень. Виявили, що за $V_f \leq 10\%$, коли ця віддаль перевищує діаметр волокна d , деформація композиту в околі вершини надрізу неоднорідна (рис. 3). Якщо віддаль між волокнами $\leq 0,5d$, то деформацію можна вважати однорідною, що дає можливість використовувати підходи лінійної механіки руйнування для оцінки міцності та тріщиностійкості ортотропних композитних матеріалів.

За відомою базою вимірювання ($b = 1$ mm) визначали деформацію у двох взаємно перпендикулярних напрямках: вздовж лінії початкового надрізу $\varepsilon_x(x)$ та перпендикулярно до неї $\varepsilon_y(x)$. За значеннями $\varepsilon_x(x)$ і $\varepsilon_y(x)$ отримали розподіл еквівалентної деформації $\varepsilon(x)$ залежно від бази вимірювання (рис. 4). За розмір умовної зони передруйнування L_p на продовженні лінії надрізу брали довжину відрізка від його вершини до точки, в якій сумарна деформація становить 0,2%. Із діаграм розтягу і зсуву плоского зразка без концентратора знаходили напруження, які відповідають деформаціям ε_x і ε_y . Їх вважали адекватними напруженням σ_0 та τ_0 у δ_c -моделі.

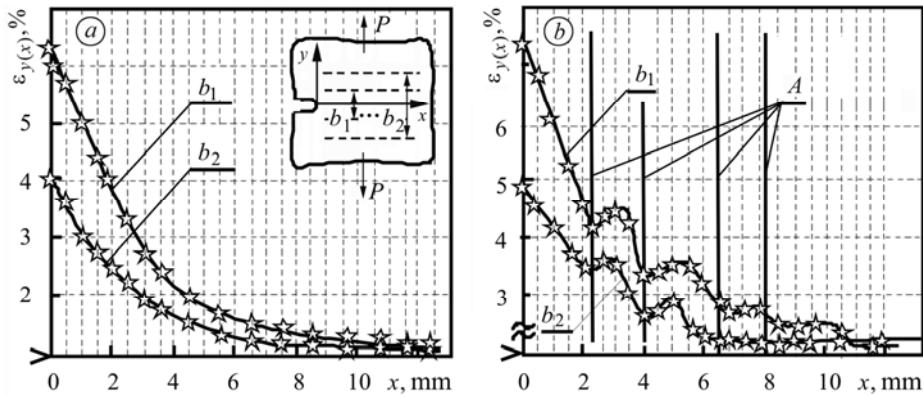


Рис. 3. Залежність деформації у зоні передруйнування композита ЕФ 32-301 від об'ємного вмісту волокна для двох баз вимірювання: $b_1 = 1$ mm; $b_2 = 4$ mm; A – армувальні волокна.

Fig. 3. Dependence of deformation in the process zone of composite EF 32-301 on fibre volume content for two measuring bases: $b_1 = 1$ mm; $b_2 = 4$ mm; A – reinforcing fibres.

Далі визначали критичні значення розкриття вершини надрізу δ_{Ic} і δ_{IIc} : перший – за силовою схемою розтягу плоского зразка з центральним надрізом, а другий – за силовою схемою консольного згину спеціального балкового зразка двотаврового профілю з надрізом на нейтральній осі [6].

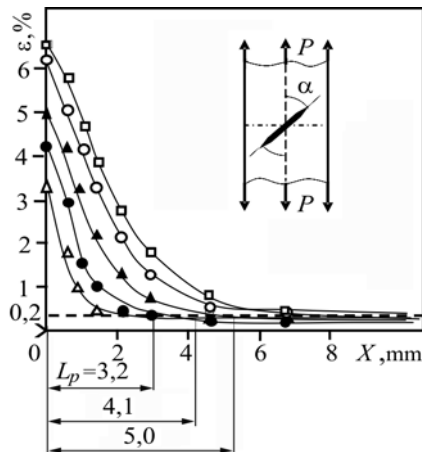


Рис. 4. Розподіл деформацій у матеріалі ЕФ 32-301 біля вершини концентратора для різних кутів орієнтації надрізу до напрямку навантаження:

\triangle – $\alpha = 15^\circ$; \bullet – 30° ;
 \blacktriangle – 45° ; \circ – 60° ; \square – $\alpha = 75^\circ$.

Fig. 4. Distribution of deformations in EF 32-301 materials at the notch tip for different angles of the notch orientation relative to the loading direction: \triangle – $\alpha = 15^\circ$; \bullet – 30° ; \blacktriangle – 45° ; \circ – 60° ; \square – $\alpha = 75^\circ$.

Критичні значення розкриття δ_I^* та зсуву δ_{II}^* біля вершини надрізу для мішаного механізму руйнування за різних кутів α визначали за полями переміщень, побудованими методом ЦСК (рис. 5). Використовуючи результати експерименту, побудували залежність питомої енергії руйнування γ_c від кута нахилу надрізу α до напрямку армування (рис. 6).

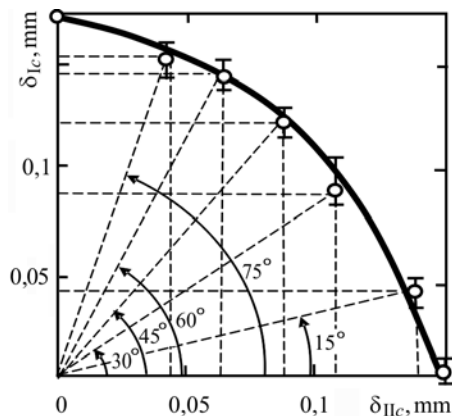


Рис. 5. Fig. 5.

Рис. 5. Діаграма критичних значень розкриття між берегами тріщини та її зсуву біля вершини у зоні передруйнування за реалізації мішаного руйнування (I+II) за різних кутів α нахилу надрізу до напрямку армування для склопластика ЕФ 32-301.

Fig. 5. Diagram of critical values of crack edges opening and its shear at the crack tip in the process zone under mixed-mode fracture (I+II) for different angles α (ЕФ 32-301).

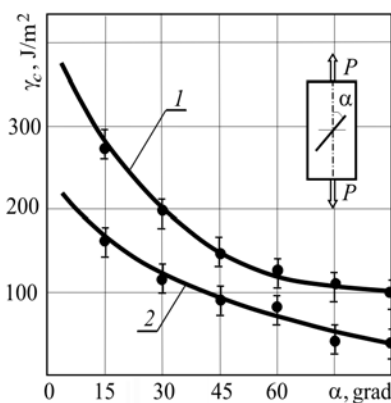


Рис. 6. Fig. 6.

Рис. 6. Залежність енергії руйнування γ_c від кута α : 1 – ЕФ 32-301; 2 – 27-63С.

Fig. 6. Dependence of fracture energy γ_c on the inclination angle α : 1 – ЕФ 32-301; 2 – 27-63С.

Результати досліджень для композитів ЕФ 32-301 та 27-63С наведені в табл. 1 і 2.

Таблиця 1

α	σ_0	τ_0	L_P	$\delta_I^*(0)$	$\delta_{II}^*(0)$	$\gamma_c, \text{J/m}^2$
	МПа			mm		
15°	300	310	2,6	0,046	0,146	280
30°	340	290	3,2	0,082	0,110	200
45°	475	275	4,1	0,128	0,082	150
60°	530	255	5,0	0,145	0,065	126
75°	565	230	5,7	0,155	0,042	111

Таблиця 2

α	σ_0	τ_0	L_P	$\delta_I^*(0)$	$\delta_{II}^*(0)$	$\gamma_c, \text{J/m}^2$
	МПа			mm		
15°	200	205	2,9	0,051	0,146	158
30°	230	190	3,4	0,090	0,120	127
45°	330	175	4,5	0,142	0,083	100
60°	370	160	5,3	0,160	0,071	72
75°	405	145	6,71	0,174	0,047	55

За енергією руйнування γ_c та співвідношенням для коефіцієнта інтенсивності напружень для ортотропної пластини з тріщиною [1] обчислили граничні навантаження за різних кутів α орієнтації надрізу до головної осі ортотропії (рис. 7, крива 1). Аналогічні розрахунки виконали за відомим силовим підходом (рис. 7, крива 2) [7]. Результати розрахунків критичного зусилля P_* порівняли із експериментально встановленим P_*^e .

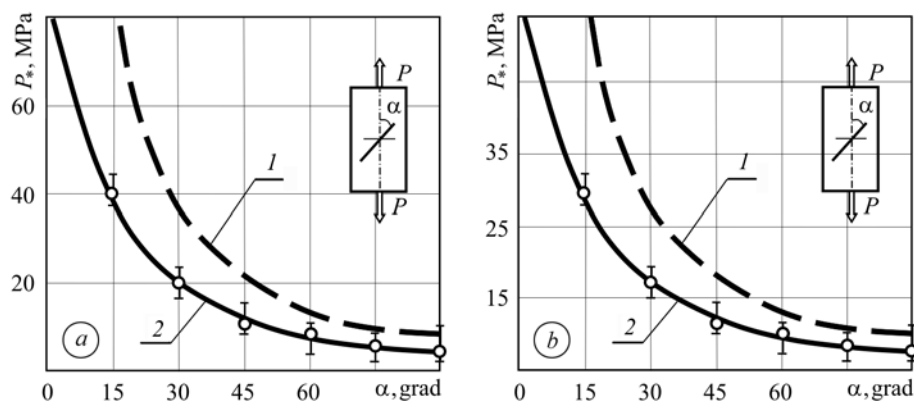


Рис. 7. Залежність граничного навантаження P_* від кута α для склопластиків ЕФ 32-301 (а) і 27-63С (б): 1 – силовий підхід; 2 – енергетичний; \circ – експериментальні дані.

Fig. 7. Dependence of critical loading, P_* , on angle α for ЕФ 32-301 (а) and 27-63С (б) glass plastics: 1 – force approach; 2 – energy; \circ – experimental data.

Експериментальні значення критичних навантажень за розтягу ортотропної композитної пластини з нахиленим надрізом добре корелюють з одержаними за енергетичним підходом. У результатах розрахунків за силовим підходом спостерігається розбіжність, оскільки не враховано роль дотичних напружень. Обчислені значення руйнівного навантаження для кутів нахилу надрізу $\alpha < 45^\circ$ більші за експериментальні на 40...50%, а для $45^\circ < \alpha < 75^\circ$ – на 25...30%. За нормального відриву ($\alpha = 90^\circ$) вони практично рівні.

ВИСНОВКИ

Визначено [1, 2] характеристики опірності руйнуванню полімерних композитних матеріалів під час статичного їх розтягу за розподілом полів переміщень у зоні передруйнування, побудованих методом ЦКС зображень.

Показано, що для однонаправлених композитів з об'ємним вмістом арматури $V_f > 10\%$ і віддалю між волокнами армування менше діаметра волокна деформація біля вершини надрізу однорідна, що дає змогу використовувати підходи лінійної механіки руйнування.

Побудовано залежності характеристик тріщиностійкості (ϵ , δ_I^* і δ_{II}^* , γ_c , P_*) від кута нахилу надрізу до головної осі ортотропії матеріалу. Так підтверджено положення про залежність цих характеристик ортотропних композитів за складного напруженого стану від напрямку армування.

Виявлено, що критичні значення навантаження за розтягу ортотропної композитної пластини з косим надрізом, отримані за енергетичним підходом, добре корелюють з експериментальними. За силовим підходом, коли не враховують дотичні напруження, значення руйнівного навантаження для кутів нахилу надрізу $\alpha < 45^\circ$ перевищують експериментальні на 40...50%, а для $45^\circ < \alpha < 75^\circ$ – на 20...30%. За нормального відриву ($\alpha = 90^\circ$) вони практично збігаються.

РЕЗЮМЕ. Определены характеристики трещиностойкости тонколистовых ортотропных полимерных композиционных материалов на основе построенных методом цифровой корреляции спекл-изображений полей перемещений и деформаций в зоне предразрушения. Установлено, что для волокнистых однонаправленных композитов при сложном напряженном состоянии энергия разрушения и критические напряжения зависят от угла ориентации надреза к направлению армирования.

SUMMARY. Crack growth resistance characteristics of thin-walled orthotropic polymer composite materials are evaluated based on displacement fields and deformations in the process zone constructed by the method of digital speckl-images correlation. It is established that for fibrous unidirectional composites under complex stress strain state the fracture energy and critical stresses depend on the angle of the notch orientation relatively to the reinforcement direction.

1. Гвоздюк М. М., Гембара О. В. Енергетичний підхід до оцінки гранично-рівноважного стану ортотропних тіл з тріщинами // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – **40**, № 5. – С. 53–56.
(Hvozdyuk M. M. and Hemhara O. V. Energy approach to the evaluation of the limiting equilibrium state of orthotropic cracked bodies // Materials Science. – 2004. – **40**, № 5. – P. 629–634.)
2. Визначення енергії руйнування композиту з використанням методу цифрової спекл-кореляції / Я.Л. Іваницький, Л. І. Муравський, О. В. Гембара та ін. // Там же. – 2010. – **46**, № 3. – С. 85–91.
(Ivanyts'kyi Ya. L., Muravs'kyi L. I., Hembara O. V. et al. Determination of the fracture energy of a composite by the method of digital speckle correlation // Ibid. – 2010. – **46**, № 3. – P. 376–382.)
3. Тарнопольский Ю. М., Кинцис Т. Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. – М.: Химия, 1975. – 262 с.
4. ГОСТ 25.601-80. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной повышенной и пониженной температурах. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 8 с.
5. Муравський Л. І., Гвоздюк М. М., Половинко Т. І. Визначення поверхневих деформацій композитів методами цифрової спекл-кореляції // Фіз.-хім. механіка матеріалів – 2007. – **43**, № 4. – С. 103–106.
(Muravs'kyi L. I., Hvozdyuk M. M., and Polovynko T. I. Evaluation of the surface strains in the composites by the methods of digital speckle correlation // Materials Science. – 2007. – **43**, № 4. – P. 568–573.)
6. Методические рекомендации. Расчёты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей. Определение характеристик трещиностойкости полимерных композиционных материалов при статическом нагружении / А. Е. Андрейкив, Л. Т. Бережницкий, М. Э. Чапля, Н. М. Гвоздюк – Львов: ФМИ им. Г. В. Карпенка НАН Украины, 1984. – 78 с.
7. Божидарнік В. В., Андрійків О. Є, Сулим Г. Т. Механіка руйнування, міцність і довговічність неперервно-армованих композитів. – Луцьк: Надстир'я, 2007. – **1**. – 400 с.

Одержано 23.10.2012