

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ БАГАТОШАРОВИХ СТРУКТУР ІЗ ПРОЗОРИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ ОПТИЧНИМИ МЕТОДАМИ

Ю. А. РУДЯК, М. І. ПІДГУРСЬКИЙ

Тернопільський державний медичний університет ім. І. Я. Горбачевського;

Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя

Комплексно досліджено напружено-деформований та граничний стани багатошарових структур (гомогенних та гетерогенних триплексів) з тріщиноподібними дефектами в їх елементах у діапазоні 213...293 К. Для ефективного визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень біля вершин тріщин в органічному та неорганічному склі розвинуто поляризаційно-оптичний метод для величин оптичної анізотропії, менших за 1λ , де λ – довжина хвилі зондувального випромінювання. Для оцінки граничного стану триплексів, елементами яких є органічне і неорганічне скло та склеювальний шар, запропоновано фізико-механічний критерій граничного стану – критерій тензора діелектричної проникності. Проаналізовано міцність чотирьох варіантів триплексів (гомогенний без та з обрамленням, гетерогенний без та з обрамленням) і вибрано оптимальну конструкцію – гетерогенний триплекс без обрамлення.

Ключові слова: *напружено-деформований стан, триплекс, структура, критерій, діелектрична проникність.*

Багатошарові структури як елементи сучасних конструкцій та вузлів агрегатів все частіше використовують в інженерній практиці. Розв'язання граничних задач теорії пружності суттєво ускладнюється, якщо шари містять технологічні та конструктивні концентратори, особливо тріщиноподібні дефекти та включення. Для таких структур відсутні ефективні методи, які б комплексно оцінювали розподіл напружено-деформованого стану (НДС) та граничний стан. Проаналізовано [1, 2] міцність складних структур (включаючи шаруваті) з тріщинами та надрізами. Виявлено, що під час досліджень на ударну в'язкість зразків Шарпі тріщина просувається лише до першої на її шляху площини з'єднання шарів. Крім того, наведено інформацію [2], що окрім тріщин, які виникають усередині шаруватих матеріалів, доволі часто під час їх виготовлення та експлуатації утворюються і поверхневі тріщини-надрізи, або області локального поверхневого розшарування. Наведено [3] результати експериментального визначення НДС гомогенних та гетерогенних триплексів в умовах низьких температур методом фотопружності. Виявлено, що під час охолодження триплексів до 213 К тріщини можуть зароджуватись як в елементах триплексів, так і у склеювальному шарі. Але не узагальнено результатів комплексної оцінки НДС та граничного багатошарових структур за можливого виникнення тріщин у їх елементах.

Нижче комплексно досліджено НДС та граничний стан багатошарових структур (триплексів) з тріщиноподібними дефектами в їх елементах.

Метод дослідження. Вивчали міцність триплексів за кімнатної та пониже-них температур, застосовуючи модифікований поляризаційно-оптичний метод [4] для оцінювання малих величин (до 1λ , де λ – довжина хвилі світла зондувального випромінювання) оптичної анізотропії та фізико-механічний критерій гра-

ничного стану діелектриків – критерій тензора діелектричної проникності (ТДП) [5]. Моделі зразків із епоксидної смоли аналізували поляризаційно-оптичним методом з допомогою координатно-синхронних поляриметрів КСП-7 та КСП-10. Кінетику руйнування неорганічного силікатного скла вивчали, використовуючи агрегатні поляризаційні мікроскопи ПОЛАМ Р-312 та ПОЛАМ Л-211. Напружений стан гомогенних та гетерогенних триплексів за знижених температур – поляриметром КСП-7.

Результати та їх обговорення. Комплексно досліджували НДС та граничний стан гомогенних та гетерогенних триплексів з дефектами типу тріщин в їх елементах, зокрема, кінетику руйнування неорганічного силікатного скла, а на моделях з епоксидної смоли – вплив обрамлення на розподіл коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) під час проростання поверхневих тріщин (надрізів) у наскрізні в склеювальному шарі. Крім того, аналізували результати руйнування органічного скла та вивчали напружений стан триплексів за знижених температур (до 213 К). За допомогою критерію ТДП оцінювали граничний стан триплексів за наявності у їх елементах тріщиноподібних дефектів. Основні оптико-механічні характеристики скла С52-1 такі [6]: густина $\rho = 2,29 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$, границя міцності за згину $\sigma^* = 73 \text{ МПа}$, тріщиностійкість (сухе скло) $K_C = 0,71 \text{ МПа} \cdot \text{m}^{1/2}$ і $K^T_C = 0,50 \text{ МПа} \cdot \text{m}^{1/2}$ (вологість 100%, 95°C), ударна в'язкість $1,8 \text{ kJ/m}^2$, коефіцієнт лінійного розширення $\alpha = 5,2 \cdot 10^6 \text{ 1/K}$, температура м'якнення $T = 585^\circ\text{C}$, термотривкість 180°C , коефіцієнт пропускання світла 98%, коефіцієнт оптичної чутливості $C = 0,34 \cdot 10^7 \text{ 1/MPa}$. Характеристики інших досліджуваних матеріалів наведені в табл. 1 і 2.

Таблиця 1. Основні оптико-механічні характеристики органічного скла

Матеріал	Модуль пружності $E \cdot 10^3, \text{ МПа}$	Границя міцності на розтяг $\sigma^*, \text{ МПа}$	Тріщиностійкість $K_C, \text{ МПа} \cdot \text{m}^{1/2}$	Відносне видовження за розриву, %	Ударна в'язкість, kJ/m^2	Температура м'якнення $T, ^\circ\text{C}$	Коефіцієнт пропускання світла, %	Коефіцієнт оптичної чутливості $C \cdot 10^{-7}, \text{ 1/MPa}$
Е-2	3,5	82	1,19	2,8	12	112	96	4,8
СО	2,9...3,2	78	1,15	3,2	10	92	91...93	0,21

Таблиця 2. Основні оптико-механічні характеристики епоксидних смол

Матеріал	293 К				Температура “заморожування”				
	Модуль пружності $E \cdot 10^3, \text{ МПа}$	Границя міцності на розтяг $\sigma^*, \text{ МПа}$	Тріщиностійкість $K_C, \text{ МПа} \cdot \text{m}^{1/2}$	Коефіцієнт оптичної чутливості $C \cdot 10^{-7}, \text{ 1/MPa}$	Температура “заморожування” $T_1, ^\circ\text{C}$	Модуль пружності $E_1, \text{ МПа}$	Границя міцності на розтяг $\sigma_1, \text{ МПа}$	В'язкість руйнування $K_{11}, \text{ kPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	Коефіцієнт оптичної чутливості $C_1 \cdot 10^{-7}, \text{ 1/MPa}$
ЕД-20М	3,2	52	1,23	4,3	135	27	1,32	33	143
ЕД-16	2,8	47	1,18	4,1	130	24	1,27	29	128
ЕПСА	1,9	41	1,11	5,4	80	16	1,09	19	212

За результатами випроб проаналізували руйнування неорганічного силікатного скла С52-1. Визначали КІН K_I , K_{II} та еквівалентні КІН K_0 . Для точнішої оцінки граничного стану матеріалів застосували критерій ТДП, який ґрунтується на рівняннях Максвелла та Неймана. Вираз для еквівалентного напруження σ_0 за цим критерієм такий [5]:

$$\sigma_0 = (C_1 / C_2) \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3, \quad (1)$$

де C_1 , C_2 – оптико-механічні константи матеріалу, які визначають з тарувальних експериментів; σ_1 , σ_2 , σ_3 – головні напруження.

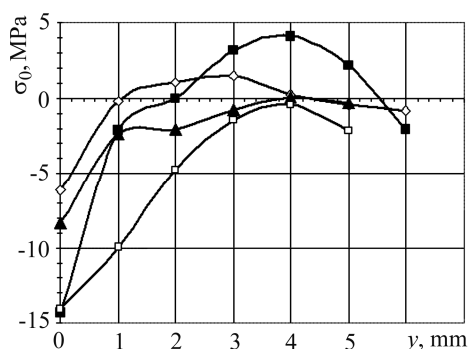
Вираз для КІН K_0 за критерієм ТДП має вигляд

$$K_0 = A \cdot K_I + B \cdot K_{II}. \quad (2)$$

Для скла С52-1 значення констант C_1 , C_2 досить близькі, тому у виразі (2) приймаємо параметри A і B рівними. Звідси

$$K_0 = A \cdot (K_I + K_{II}) \quad (3)$$

(для електровакуумного скла С52-1 $A = 0,806$).



Розподіл еквівалентних напружень σ_0 в неорганічному силікатному склі для чотирьох конструктивних варіантів гомогенних та гетерогенних триплексів при 213 К (y – координата точки вимірювання): \diamond – гомогенний триплекс без обрамлення (зразок 1); \blacksquare – з обрамленням (зразок 2); \blacktriangle – гетерогенний триплекс без обрамлення (зразок 3); \square – з обрамленням (зразок 4).

Distribution of equivalent stresses σ_0 in inorganic silicate glass for four constructive design types of homogeneous and heterogeneous triplexes at 213 K (y is measuring coordinate point):

\diamond – homogeneous triplex without frame (specimen 1); \blacksquare – with frame (specimen 2); \blacktriangle – heterogeneous triplex without frame (specimen 3); \square – with frame (specimen 4).

Після визначення КІН K_I та K_{II} поляризаційно-оптичним методом [4] і розрахунку еквівалентного КІН за формулою (3) встановили, що склопластинки з неорганічного силікатного скла з межовими тріщинами руйнуються з досягненням коефіцієнта $K_0 = 0,45 \dots 0,60 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ (розтяг) та $0,41 \dots 0,52 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ (треточковий згин), а середнього руйнівного напруження $\sigma_0 = 4,48 \text{ МПа}$. За результатами аналогічних експериментів одержали інформацію про руйнування пластин з органічного скла з межовими тріщинами та оцінили вплив обрамлення на КІН під час проростання поверхневих тріщин у наскрізні в склеювальному шарі. Досліджували чотири триплекси різного конструктивного виконання: гомогенний (неорганічне силікатне скло–склеювальний шар–неорганічне силікатне скло) розмірами $100 \times 14 \times 10 \text{ мм}$ (зразок 1) та з обрамленням розмірами $100 \times 14 \times 10 \text{ мм}$, товщина обрамлення 2 мм (зразок 2); гетерогенний без обрамлення (неорганічне силікатне скло–склеювальний шар–органічне скло) розмірами $100 \times 9 \times 10 \text{ мм}$, товщина шару неорганічного силікатного скла 5 мм , склеювального шару 2 мм , органічного скла 2 мм (зразок 3) та з обрамленням розмірами $100 \times 9 \times 10 \text{ мм}$, товщина шару неорганічного силікатного скла 5 мм , склеювального шару 2 мм , органічного скла 2 мм , обрамлення 2 мм (зразок 4). Побудували (див. рисунок) графіки розподілу усереднених значень експериментально визначених еквівалентних КІН K_0 в неорганічному силікатному склі (як найнебезпечнішому елементі триплекса

за наявності тріщин) для чотирьох конструктивних варіантів гомогенних та гетерогенних триплексів при 213 К. Виявили, що за наявності тріщиноподібних дефектів у елементах триплексів під час охолодження до 213 К гетерогенність є позитивним фактором, а обрамлення – негативним.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що електровакуумне скло руйнується за КІН $0,45...0,60 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ (за розтягу пластин з межовими тріщинами) та $0,41...0,52 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ (за триточкового згину). Відповідне середнє руйнівне напруження становить 4,48 МПа. Проаналізовано результати руйнування пластин з органічного скла (як складника гетерогенних триплексів) СОС-174, СОЗ-033.5, СОЗ-083, СОО-112, СОЗ-062 з межовими тріщинами, які утворювали кути $80...85^\circ$ з напрямком розтягальних зусиль. Середнє значення руйнівного напруження для оргскла 9,92 МПа. За результатами експериментальних досліджень елементів триплексів з тріщиноподібними дефектами проаналізовано вплив гетерогенності та обрамлення і вибрано оптимальний варіант конструктивного рішення триплекса – гетерогенний без обрамлення.

РЕЗЮМЕ. Комплексно исследованы напряженно-деформированное и предельное состояния многослойных структур (гомогенных и гетерогенных триплексов) с трещиноподобными дефектами в их элементах в диапазоне 213...293 К. Для эффективного определения коэффициентов интенсивности напряжений возле вершин трещин в органическом и неорганическом стекле развит поляризационно-оптический метод для величин оптической анизотропии, меньших за 1λ , где λ – длина волны зондирующего излучения. Для оценки предельного состояния триплексов, элементами которых является органическое и неорганическое стекло и склеивающий слой, предложен физико-механический критерий предельного состояния – критерий тензора диэлектрической проницаемости. Проанализирована прочность четырех вариантов триплексов (гомогенный без и с обрамлением, гетерогенный без и с обрамлением) и выбрана оптимальная конструкция – гетерогенный триплекс без обрамления.

SUMMARY. The stress-strain state and limiting state of multilayer structures (homogeneous and heterogeneous triplex) with crack-like defects in their elements in the temperature range 213...293 K are studied in a complex. In order to determine effectively the values of the stress intensity factors (SIF) at the crack tips in organic and inorganic glass, the polarization-optical method was developed for the cases of investigation of small size (to 1λ , where λ is wavelength of the probe radiation) patterns of optical anisotropy. To assess the limiting state of the triplex, with component parts (elements) that are organic and inorganic glass and cementing the layer, the physicomchanical criterion of the limiting state – the criterion of tensor of dielectric permeability (TDP) is proposed. As a result of the studies four options for constructive solutions of triplex (homogeneous triplex without frame and with frame, heterogeneous triplex without frame and with frame) are analyzed in terms of the strength and the optimum constructive design – heterogeneous triplex without frame – was defined.

1. Панасюк В. В. Механика квазихрупкого разрушения. – К.: Наук. думка, 1991. – 416 с.
2. Божидарнік В. В., Андрейків О. Є., Сулим Г. Т. Механіка руйнування, міцність і довговічність неперервно армованих композитів. – Луцьк: Надстир'я, 2007. – 824 с.
3. Мильніков О. В., Підгурський М. І. Дослідження напружено-деформованого стану триплексів при експлуатації в умовах знижених температур // Вісник Терноп. нац. техн. ун-ту. – 2012. – № 2 (66). – С. 52–62.
4. Кепич Т. Ю., Рудяк Ю. А. Оптический метод механики разрушения // XV Symposium Mechaniki Eksperymentanej. – Jachranka, 1992. – С. 146–148.
5. Рудяк Ю. Критеріальне оцінювання ресурсу полімерних елементів машин // Вісник Терноп. нац. техн. ун-ту. – 2012. – № 4 (68). – С. 88–91.
6. Бартимеров Г. М. Зеленов Ю. В. Физика и механика полимеров. – М.: Высш. шк., 1988. – 392 с.

Одержано 15.12.2014