

ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ КРИТЕРІЙ ГРАНИЧНОГО СТАНУ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Запропоновано фізико-механічний критерій граничного стану для елементів машин та конструкцій, виготовлених з діелектриків. Критерій міцності для таких матеріалів (наприклад, полімерів) одержано шляхом зв'язку граничного стану з граничним (критичним) значенням компонент тензора діелектричної проникності. Такий критерій міцності дозволяє більш точно, ніж класичні механічні описувати граничний стан діелектриків.

Ключові слова: критерій міцності, граничний стан, діелектрики, полімери.

Physico-mechanical criterion for limit state of machine elements and structures made of dielectrics has been proposed in article. Criterion of the strength of materials (such as polymers) was obtained Limit state and ultimate (critical) value component of the permittivity tensor were combined. Such strength criterion describes the ultimate state of dielectrics more accurate than the classical mechanical criteria.

Keywords: test of strength, limiting state, dielectrics, polymers.

Вступ

Міцність елементів машин, констукцій, виготовлених з полімерних матеріалів залежить як від групи немеханічних факторів (температури, вологості, радіації), так і від таких механічних факторів, як вид напруженого стану, наявність концентраторів, крайового ефекту, розмірів деталі [1, 2, 3, 4]. Існуючі механічні теорії міцності дають більш стабільні результати для металів, ніж для полімерних матеріалів [5].

Відомо, що за своєю структурою полімери можна розділити на лінійні (до яких відносяться оргскло) та сітчасті (до яких відносяться матеріали на базі епоксидних смол). Для лінійних полімерів характерний більш закономірний характер руйнування, ніж для сітчастих. Для сітчастих полімерів, як правило, знаходять статистичні залежності для деяких середніх значень.

Постановка завдання

Метою нашої роботи була розробка критерія міцності, який би дозволяв більш точно, ніж відомі механічні критерії описувати граничний стан полімерів. Для цього запропоновано підхід, який би поєднував механіку та фізику полімерів на макрорівні (тобто, на рівні закономірностей механіки суцільного середовища). Нижче наведено теоретичне обґрунтування запропонованого методу.

Як відомо, полімери відносяться до діелектриків, однією з основних макрофізичних характеристик яких є діелектрична проникність. Оскільки це одна з базових величин, яка інтегрально характеризує фізико-механічний комплекс параметрів діелектрика, логічно зв'язати граничний стан полімеру з граничним значенням компонент тензора діелектричної проникності (ТДП). Такий підхід, на нашу думку, дозволить більш глибоко, в комплексі, оцінювати граничний стан полімерів, ніж існуючі чисто механічні критерії міцності. Крім того, критерій ТДП дозволить більш точно реагувати на, навіть незначні, зміни структури самого полімера, його температури, вологості оточуючого середовища. Оскільки «фізична складова» у питаннях механічної міцності полімерів набагато вагоміша, ніж у випадку виробів з металів.

Результати дослідження

Запишемо рівняння зв'язку компонент ТДП та напруженого стану (рівняння Максвелла):

$$\begin{aligned}\chi_1 &= \chi_0 + C_1\sigma_1 + C_2(\sigma_2 + \sigma_3) \\ \chi_2 &= \chi_0 + C_1\sigma_2 + C_2(\sigma_1 + \sigma_3) \\ \chi_3 &= \chi_0 + C_1\sigma_3 + C_2(\sigma_1 + \sigma_2),\end{aligned}\tag{1}$$

де χ_i ($i=1, 2, 3$) – головні компоненти ТДП;

σ_i ($i=1, 2, 3$) – головні компоненти напружень.

C_1, C_2 – абсолютні оптико-механічні постійні діелектрика по напруженням.

Після ряду перетворень, система (1) набуде вигляду:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta\chi_1}{C_2} &= \frac{C_1}{C_2}\sigma_1 + (\sigma_2 + \sigma_3) \\ \frac{\Delta\chi_2}{C_2} &= \frac{C_1}{C_2}\sigma_2 + (\sigma_1 + \sigma_3) \\ \frac{\Delta\chi_3}{C_2} &= \frac{C_1}{C_2}\sigma_3 + (\sigma_1 + \sigma_2)\end{aligned}\tag{2}$$

Згідно критерія ТДП руйнування полімеру буде мати місце при виконанні умов:

$$\left(\frac{\Delta\chi_i}{C_2}\right)_{\max.} = \delta_*^0 \quad (3)$$

(i=1, 2, 3),

де δ_*^0 - граничне значення відносної компоненти ТДП при даних фізичних умовах (температурі, вологості, радіаційному фоні) та певних механічних факторах (вид напруженого стану, співвідношення компонент напруженого стану, масштабний фактор).

У фундаментальні рівняння Максвелла (1) входять абсолютні оптико-механічні константи діелектрика по напруженням C_1 та C_2 . У той же час, при моделюванні задач механіки соціального середовища за допомогою поляризаційно-оптичного методу використовується базове рівняння закону Вертгейма.

$$\frac{\delta}{Cd} = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (4)$$

де $C = C_1 - C_2$.

У формулі (4) C – відносна оптико-механічна константа по напруженням. У фотопружності C ще називають коефіцієнтом оптичної чутливості прозорого полімера.

З вище наведеного зрозуміло, що визначення абсолютних оптико-механічних констант C_1 та C_2 , їх співвідношення C_1/C_2 та відносного оптико-механічного коефіцієнта $C = C_1 - C_2$ є актуальною та необхідною задачею.

Відносний оптико-механічний коефіцієнт $C = C_1 - C_2$ визначають на стандартних, вже давно застосованих у поляризаційно-оптичному методі тарировочних задачах по розтягу вузької пластинки або стиску диска. Величини абсолютних оптико-механічних констант C_1 та C_2 і відповідно їх співвідношення C_1/C_2 можна визначити за даними градієнтної фотопружності [1], або за допомогою класичного поляризаційно-оптичного методу, проводячи вимірювання для двох різних величин навантаження.

Фізико-механічний критерій зв'язує зміну компонент ТДП та напружено-деформованого стану через оптико-механічні константи:

$$\Delta\chi_{ij} = C \cdot \sigma_{ij} \quad (5)$$

Закон Гука у пружній області зв'язує напруження та деформації наступним чином

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{E} \sigma_{ij} \quad (6)$$

Рівняння (5) та (6) дозволяють припустити, що між такими базовими константами матеріалу, як оптико-механічна стала та модуль Юнга I роду існує тісний кореляційний зв'язок (рис. 1).

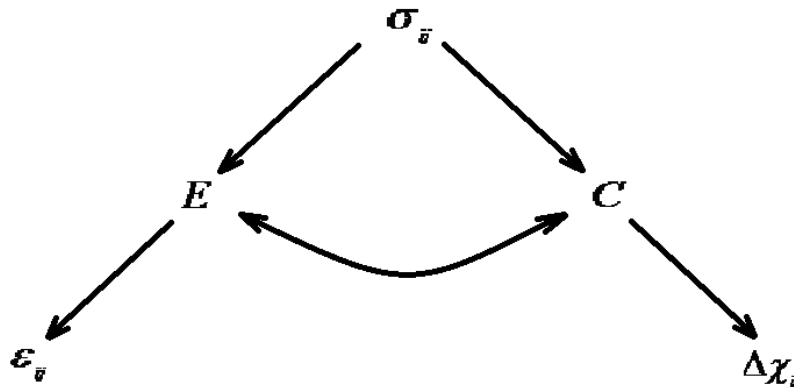


Рис. 1. Графічне зображення зв'язку між оптико-механічно сталою C та модулем Юнга I роду E

Для підтвердження цього припущення проаналізовано дані роботи [4], де вивчались константи матеріалу на базі епоксидно-діанової смоли ЕД – 20 М без та під впливом радіаційного випромінювання. Наведено таблицю, у якій дано величини коефіцієнтів оптичної чутливості C та модуль Юнга I роду E у цьому випадку.

Наведено дані цієї роботи у вигляді таблиці 1, у якій додано стовпчик розрахункових коефіцієнтів кореляції між зміними C та E , несуттєві для нашого аналізу дані роботи [4] не наводяться.

У таблиці 1 дані по зміні величин C та E наведено у формі співвідношень C/C_0 та E/E_0 , відповідно, де C_0 та E_0 – коефіцієнт оптичної чутливості та модуль Юнга I роду для неопроміненого матеріалу.

C , E – ті самі значення при певній дозі опромінення.

Коефіцієнт кореляції для трьох варіантів складу полімерного матеріалу на базі епоксидно-діанової смоли при різних дозах випромінювання був, практично, однакової величини, і становив, у середньому, $r_{xy}^{сер} = -6,6449 \cdot 10^{-1}$.

Розрахункові коефіцієнти кореляції між змінами величини коефіцієнтів оптичної чутливості та модулем Юнга I роду E

Варіант складу полімерного матеріалу	Радіаційне випромінювання	Величина коефіцієнта		Коефіцієнт кореляції
	$M_{\text{рад.}}$	E/E_0	C/C_0	Γ_{xy}
ЕД – 20 М	0	1	1	$-6,6578 \cdot 10^{-1}$
	5	1,45	0,72	
	10	1,63	0,58	
ЕД – 20 М УП-0623 5В.4.	0	1	1	$-6,6446 \cdot 10^{-1}$
	5	1,14	0,90	
	10	1,19	0,85	
ЕД – 20 М УП-0623 10В.4.	0	1	1	$-6,6323 \cdot 10^{-1}$
	5	1,09	0,93	
	10	1,10	0,93	

Така величина коефіцієнта кореляції вказує на досить сильний кореляційний зв'язок між змінами величин оптико-механічної константи C та модулем Юнга I роду E .

Виходячи з фізико-механічного критерія ТДП, підвищення міцності полімерів можливе двома шляхами: зниженням величини оптико-механічної константи C або підвищенням $|\Delta\chi_i|_{\text{адд.}}$, тобто збільшенням величини співвідношення $|\Delta\chi_i|_{\text{адд.}}/C$. У критерії ТДП цей параметр позначено σ_* . Причому, оскільки оптико-механічна константа C , внаслідок тісного кореляційного зв'язку з модулем пружності I роду E , повинна більше реагувати на структурні зміни матеріалу (наприклад, процес переходу епоксидної смоли у високоеластичний стан, армування полімера волокнами – створення композитів, зміни у структурі під впливом опромінювання), а $|\Delta\chi_i|_{\text{адд.}}$ може залежати і від інших факторів. Так, наприклад, при переході матеріалу на базі епоксидної смоли зі скловидного у високоеластичний стан коефіцієнт оптичної чутливості зростає, у середньому, в 40 разів, міцність при цьому знижується у 30-40 разів, тобто $|\Delta\chi_i|_{\text{адд.}}$ при цьому змінюється незначно. У той же час зміна температури полімера у незначному діапазоні (10 К-20 К) може досить суттєво змінювати міцність, при практично, незміненому C . Отже, у цьому випадку більший внесок у зміну міцності вносить зміна $|\Delta\chi_i|_{\text{адд.}}$.

Висновки

Запропоновано фізико-механічний критерій граничного стану, який базується на граничних значеннях компонент тензора діелектричної проникності.

Встановлено тісний кореляційний зв'язок між оптико-механічною сталою матеріалу C та модулем Юнга I роду E .

Література

1. Кепич Т. Ю. Оптичний метод визначення напружено-деформованого стану об'єктів шляхом аналізу поглинання світла / Т. Ю. Кепич, О. В. Мильников, Ю. А. Рудяк. – К.: Вісник КНУ, серія фіз.мат.науки, В. 5, 2003. – С. 45-53.
2. Мильников А. В. Исследование термонапряженного состояния турбинного диска методом радиационной фотоупругости / А. В. Мильников, В. И. Савченко // Экспериментальные исследования напряжений и деформация / Киев. Ун-т. – Киев, 1983. – С.14-25. Деп. В УкрНИИТИ. 30.01.84. № 131 – Ук 84
3. Табанюхова З.М. Решение задач прочности сооружений с концентраторами методом фотоупругости : автореф. на соиск. науч. степени докт.физ.-мат. наук: спец. 01.02004. «Механика деформируемого твердого тела» / М. В. Табанюхова – Новосибирск, 2006. – 42 с.
4. Hecker F.W. Non-rectilinear light propagation in photoelastic specimens caused by stress gradient / Presented at 1979 SESA Spring Meeting San Francisco, California, May, 1979.
5. Каминский А. А. Механика разрушения полимеров / А. А. Каминский, Д. А. Гаврилов – К: Наук. думка, 1988. – 224 с.

Надійшла 29.1.2013 р.
Статтю представляє: к.т.н. Рудяк Ю.А.