

УДК 539.3; 678.067

ЕФЕКТИВНІ ТЕРМОПРУЖНІ МОДУЛІ ДИСКРЕТНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ ШАРІВ У РАМКАХ МОДЕЛІ ОРТОТРОПНОГО МАТЕРІАЛУ

Михайло Марчук^{1,2}, Володимир Харченко^{1,3}, Микола Хом'як^{1,4}, Віра Пакош¹

¹Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, м. Львів;

²Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів;

³Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», м. Дніпро;

⁴Львівський національний університет імені Івана Франка, м. Львів

Композиційні матеріали (КМ) знаходять все ширше застосування, найперше, в таких передових галузях як аерокосмічна техніка, судно-, автомобіле- та спеціальне машинобудування, де ставляться підвищені вимоги щодо міцності та надійності, а також оптимальності конструкцій [1]. Шаруваті структури, зокрема, полімерні композити, сформовані шляхом неперервної намотки чи на тканий основі, часто забезпечують необхідний баланс між складністю виготовлення та умовами навантаження на різних режимах, у широких діапазонах зміни фізико-механічних параметрів. Проте розрахунок напружено-деформованого стану (НДС) конструктивних елементів із КМ безпосередньо залежить від заданих термопружних властивостей [2–5]. Для шаруватих КМ часто застосовують модель ортотропного матеріалу:

$$\varepsilon_{ij} = C_{ijkl} \sigma_{km} + \delta_{ij} \alpha_{ij} \Delta T.$$

Прикладом є шари з симетричною укладкою волокон однакової об'ємної частки. Навпаки, гібридні шаруваті композити мають не тільки намотку під різними кутами, але й армувальні волокна з різними властивостями [6].

Комп'ютерне моделювання є важливим підходом до дослідження поведінки шаруватих композиційних елементів і конструкцій в цілому та дає змогу з різним ступенем деталізації розглядати пакет шарів. Як правило, на макрорівні використовують деякі усереднені характеристики на основі характеристик складових композиту та інших його особливостей.

Застосовуючи структурний підхід, в рамках прийнятих гіпотез, за допомогою змішаної методики усереднення з використанням підходів Фойгта (W.Voigt) та Ройсса (A. Reuss), отримано розрахункові формули для ефективних пружних модулів шаруватого КМ, як ортотропного тіла. Особливість запропонованої моделі полягає у виокремленні двох підмножин шарів, які відповідають двом напрямкам ортотропії в площині пакету шарів. Тому, наприклад, для модуля Юнга E_{11} в напрямку переважаючого армування і використовуємо арифметичне усереднення, а для модуля E_{22} в цьому напрямку –

гармонійне усереднення. Також отримано вирази для модуля Юнга E_{33} , тобто побудовано повну 3D-модель ортотропного матеріалу, яку можна використовувати в сучасних системах скінченно-елементного аналізу.

Зауважимо, що класифікація шарів за переважаючим напрямом жорсткості вимагає додаткових експертних чи статистичних оцінок. Деяку невизначеність щодо можливого віднесення шарів до однієї з підмножин можна використати для узгодження з експериментальними даними.

Дослідження виконано в рамках науково-технічного проєкту НАН України (номер державної реєстрації 0120U104248).

1. *Rana S., Figueiro R.* Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering: Processing, Properties and Applications. – Woodhead Publishing, 2016 p. – 474 p.
2. *Vasiliev V. V., Morozov E. V.* Advanced Mechanics of Composite Materials and Structures: Fourth Edition. – Elsevier, 2018. – 856 p.
3. *Reddy J. N.* Mechanics of laminated composite plates and shells: theory and analysis, 2nd ed. – CRC Press LLC, 2004. – 832 p.
4. *Карпинос Д.М.* Композиционные материалы. Справочник. – Киев.: Наукова думка, 1985. – 592 с.
5. *Морозов А.В.* Визначення ефективних пружних характеристик односпрямованого композиційного матеріалу // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. – 2020. – **31** (70). Ч. 1, № 2. – С. 44–51.
6. *Немировский Ю.В., Янковский А.Н.* Определение эффективных физико-механических характеристик гибридных композитов, перекрестно армированных трансверсально-изотропными волокнами, и сопоставление расчетных характеристик с экспериментальными данными // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2007. – **13**, № 1. – С. 3–32.

EFFECTIVE THERMOELASTIC MODULES OF DISCRETE COMPOSITE LAYERS WITHIN THE MODEL OF ORTHOTROPIC MATERIAL

A structural approach to evaluate effective thermoelastic modules of layered composites within the framework of an orthotropic material model is proposed. The separate mixture rules for two sets of layers according to their predominant contribution into reinforcement are used.