

УДК 534.1:539.3

О.О. Горбатко, канд. техн. наук

Чернігівський державний технологічний університет, м.Чернігів, Україна

ЕФЕКТИВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ В'ЯЗКОПРУЖНОГО КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ З МІЖФАЗНОЮ ТРІЩИНОЮ

Досліджено ефективні характеристики полімерного однонаправленого волокнистого в'язкопружного композиційного матеріалу з наявністю симетричної тріщини в зоні контакту волокна і матриці за допомогою енергетичного методу.

Постановка проблеми

Зародження і розвиток недосконалої структури на межі розділу волокна і матриці у вигляді міжфазних тріщин обумовлені багатьма факторами, у тому числі з довготривалими циклічними навантаженнями конструкцій з композиційних матеріалів. Поява тріщин у таких матеріалах призводить до зміни фізико-механічних властивостей, зокрема, до погіршення характеристик міцності, оскільки достатній опір руйнуванню можливий при ідеальному контакті компонентів. Однак ідеального контакту при виготовленні композиційних матеріалів досягти майже неможливо, оскільки існує певний відсоток вірогідності того, що внаслідок істотних відмінностей між властивостями волокна і матриці, недосконалості структури у вигляді мікротріщин з'являються в міжфазній зоні вже після виготовлення матеріалу і на початковому етапі експлуатації. Ризик розвитку тріщин також пов'язаний з появою залишкових деформацій першого і другого роду внаслідок хімічних і термічних процесів у матриці і міжфазній зоні в процесі виготовлення і після затвердіння матеріалу. Особливо це стосується полімерних композитів, таких як боро- і склопластики, характеристики складових яких відрізняються на декілька порядків. У процесі експлуатації конструкцій з полімерних композиційних матеріалів невеликі тріщини збільшуються, що призводить до появи ділянок з відсутністю зв'язку між волокном і матрицею [1; 2]. В подальшому відбувається відшарування волокна від матриці і його часткове або повне проковзування. Міцність такого композиту зменшується, оскільки волокна вже не „працюють” разом з матрицею як цілісний матеріал, змінюються інші фізико-механічні характеристики [3].

Аналіз досліджень і публікацій

Визначення ефективних характеристик полімерних композиційних матеріалів з наявністю тріщин ускладнено наявністю в області, прилеглої до поверхні розділу фаз, полів з підвищеною інтенсивністю напружень (рис. 1) [1].

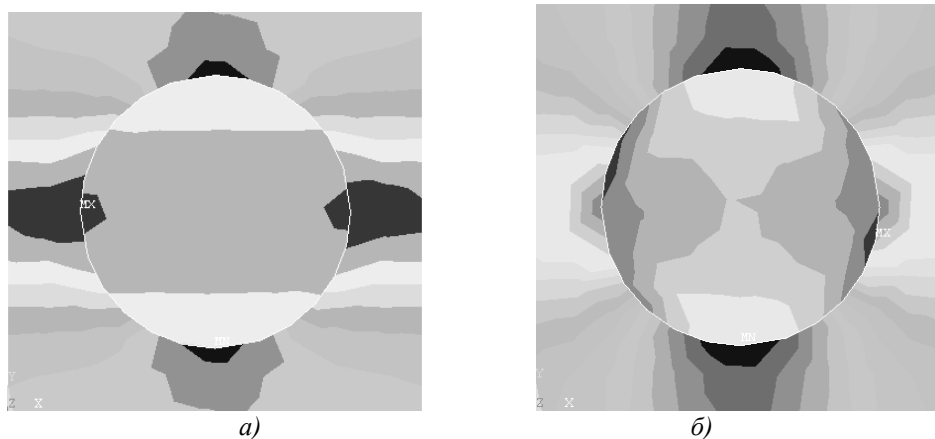


Рис. 1. Напружений стан в однонаправленому склопластику при деформаціях поперечного розтягу (а) і поздовжнього зсуву (б)

Найбільш поширеними в техніці матеріалами, що широко використовуються в різноманітних конструкціях, є армовані волокнами однонаправлені полімерні композиційні матеріали. Найбільш перспективними вони виявляються для космічної техніки, де першочерговими вимогами є мала вага і високі характеристики міцності, жорсткості і розсіяння енергії. Велика кількість робіт щодо визначення пружних характеристик таких матеріалів пояснюється, зокрема, їх потенційно високою конструктивною ефективністю. Фізико-механічні властивості полімерних композиційних матеріалів суттєво залежать від масштабного фактору наповнювача, від орієнтації волокон, міцності контакту між матрицею і волокном, а також точністю визначення полів напружень і деформацій у матеріалі [4; 5].

Необхідна точність визначення параметрів напруженого стану досягається відповідністю масштабів його неоднорідності і відстані між точками дискретизації. Точні і наближені рішення, що враховують властивості складових і їх об'ємний вміст, структуру армування, орієнтацію тріщин і їх величину, для пружних сталей композиційних матеріалів знайдено у роботах Ванина Г.А.[1; 2].

Врахувати складні граничні умови, структурну неоднорідність і реальний розподіл напружень і деформацій у матеріалі можна за допомогою чисельних методів розрахунку. Запропонований у роботі Дубенець В.Г. [6] чисельний варіант методу енергетичної континуалізації, який базується на методі скінченних елементів, дозволяє з достатньою точністю визначати ефективні пружні і динамічні характеристики в'язкопружних композиційних матеріалів різної структури армування.

Мета статті

Метою роботи є дослідження ефективних пружних і динамічних характеристик в'язкопружних композиційних матеріалів з міжфазними тріщинами за допомогою чисельного варіанту методу енергетичної континуалізації [6].

Цей метод базується на прирівнюванні енергій деформацій композиційного матеріалу і умовного квазіоднорідного матеріалу за характерних граничних умов із застосуванням скінченно-елементних моделей матеріалів. Для опису неідеально-пружних властивостей використовуються фізичні залежності Больцмана-Вольтера, записані у частотному просторі за допомогою матриць комплексних модулів. Компоненти матриці комплексних модулів є функціями частоти коливань. Енергетичний метод дозволяє врахувати неоднорідний напружено-деформований стан матеріалу.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо в'язкопружний однонаправлений волокнистий композиційний матеріал з тетрагональною схемою армування (рис. 2).

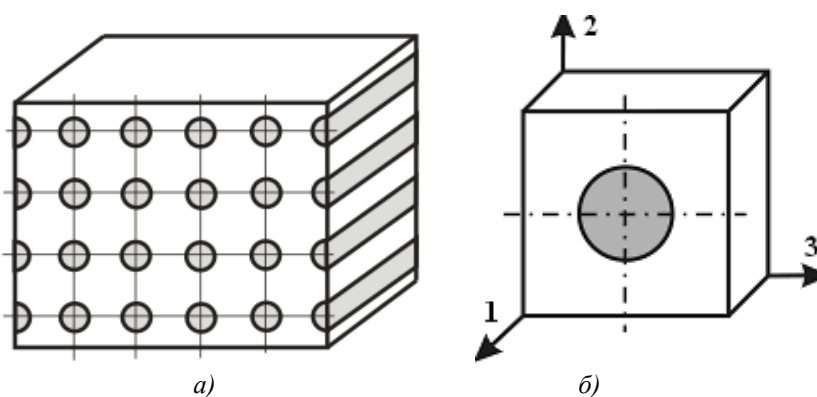


Рис. 2. Структура (а) і представницький елемент об'єму (б) однонаправленого волокнистого композиційного матеріалу з тетрагональною схемою армування

Якщо адгезія між волокном і матрицею не є ідеальною, то на міжфазній границі виникає область з дефектами структури у вигляді тріщини. Така тріщина є зоною відшарування матриці від волокна, тобто локального руйнування матеріалу. Припустимо, що така тріщина є неперервною по довжині волокна й орієнтована симетрично відносно однієї з осей симетрії (вертикальної осі) матеріалу (рис. 3). Для побудови скінченно-елементної моделі матеріалу з тріщиною в роботі було використано програмний комплекс ANSYS/ED 8.0. Представницький елемент об'єму з розбиттям на скінченні елементи представлено на рис. 3 б.

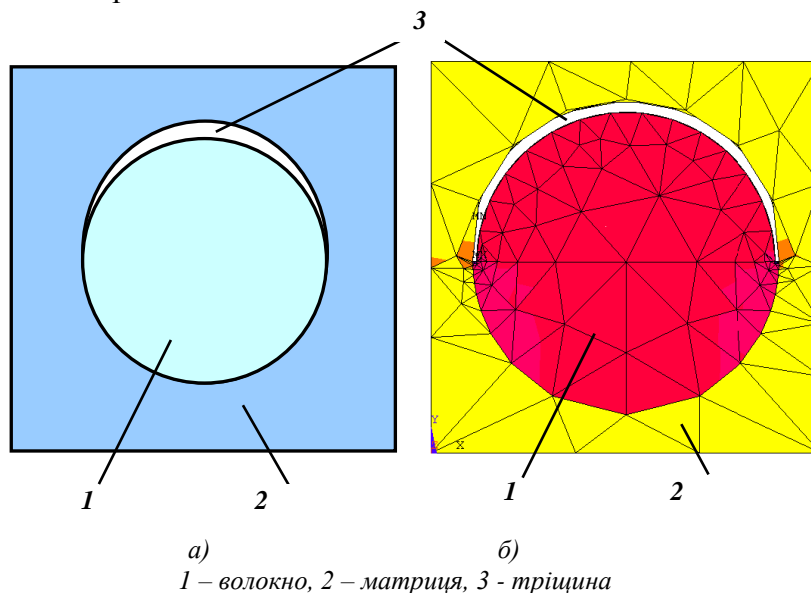


Рис. 3. Волокнистий однонаправлений композиційний матеріал з однією симетричною тріщиною: загальний вигляд (а) і представницький елемент об'єму з розбиттям на скінченні елементи (б)

Кут відкриття тріщини θ поступово збільшувався від 0° до 180° симетрично з двох боків відносно вертикальної осі симетрії. Кут $\theta = 0^\circ$ відповідає матеріалу з ідеальною адгезією компонентів (однонаправлений волокнистий композиційний матеріал без тріщини), кут $\theta = 180^\circ$ відповідає матеріалу з повним відшаруванням волокна від матриці.

Коефіцієнт армування (об'ємний вміст волокон) для композиційних матеріалів з тетрагональною структурою армування може змінюватись у діапазоні від 0 до 0,7854. В даній роботі розрахунки проводилися для волокнистого однонаправленого склопластику з коефіцієнтом армування 0,5. Характеристики складових матеріалу наведено у роботі Дубенець В.Г., Яковенко О.О. [6].

Результати розрахунків наведено у вигляді залежностей відповідних пружних і динамічних характеристик в'язкопружного полімерного волокнистого композиційного матеріалу від кута розкриття тріщини. На рис. 4 представлено залежність дійсної частини компонент матриці модулів C_{11} , C_{12} , C_{22} , C_{33} , C_{23} , C_{44} , C_{66} від кута розкриття тріщини; на рис. 5 – залежність декрементів коливальних D_1 , D_2 , D_3 , D_4 , D_5 , D_6 від кута розкриття тріщини; на рис. 6 – залежність поздовжнього модуля пружності E_1 від кута розкриття тріщини; на рис. 7 – залежність поперечних модулів пружності E_2 і E_3 від кута розкриття тріщини; на рис. 8-9 – залежності відповідно поздовжнього G_{13} і поперечного G_{12} модулів зсуву волокнистого склопластику від кута розкриття тріщини.

Для перевірки одержаних за допомогою енергетичного методу результатів проводилося порівняння з рішеннями, описаними в роботах Ванина Г.А. [1; 2], для волокнистих матеріалів з симетричними тріщинами (рис.6-9).

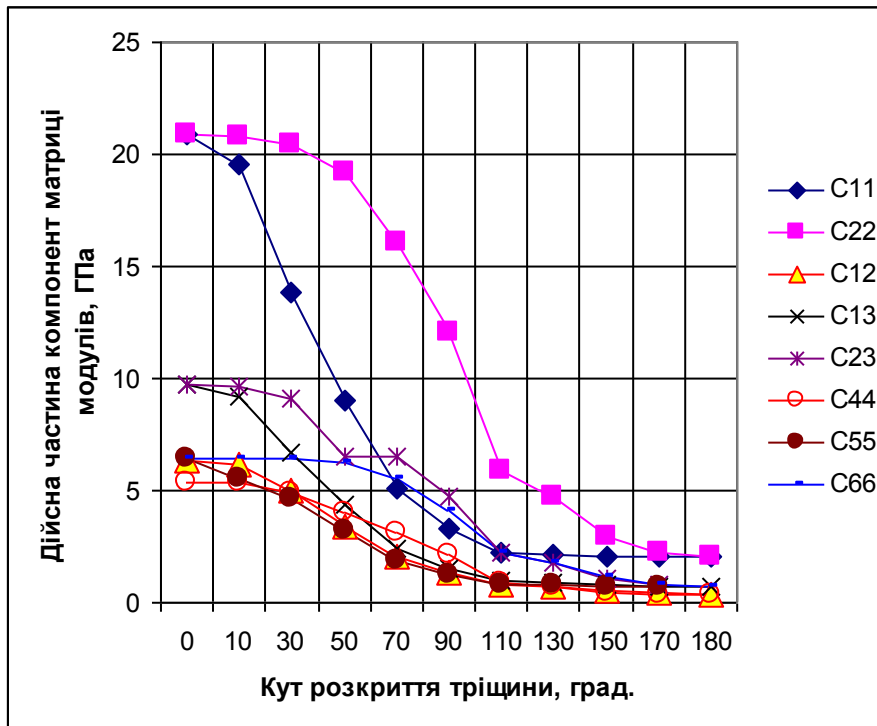


Рис. 4. Залежність дійсної частини компонент матриці модулів від кута розкриття тріщини для однонаправленого волокнистого склопластику

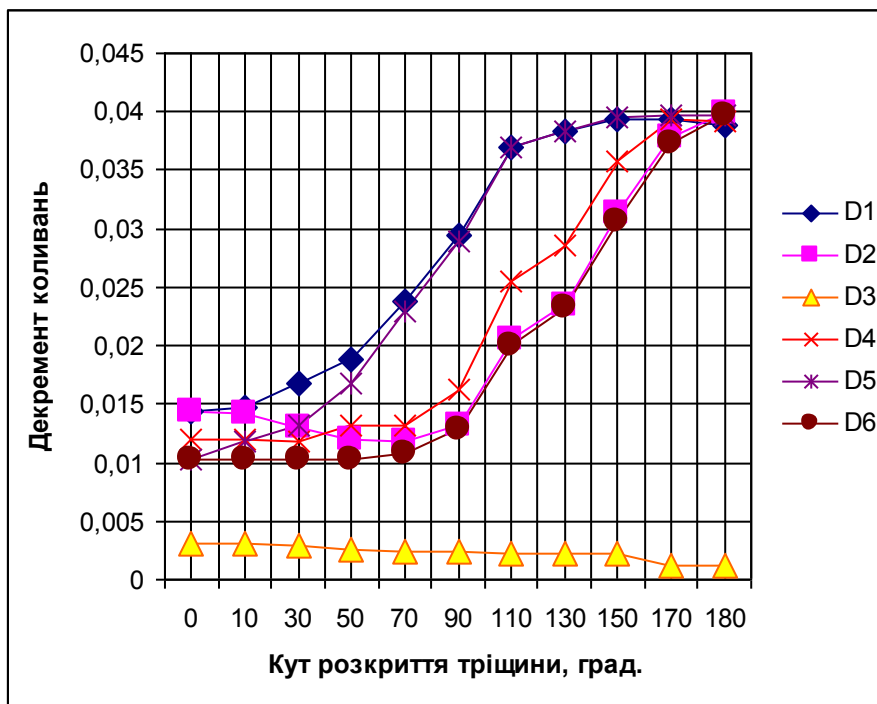


Рис. 5. Залежність декрементів коливань від кута розкриття тріщини для однонаправленого волокнистого склопластику

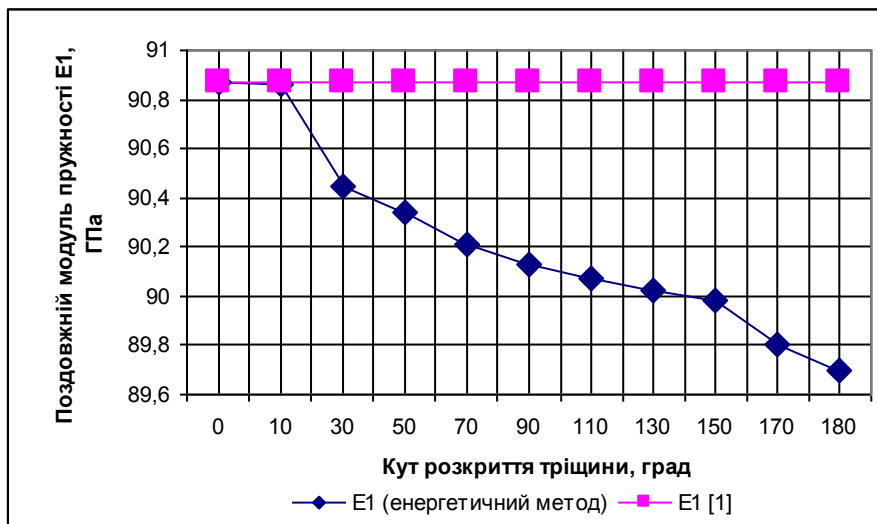


Рис. 6. Залежність поздовжнього модуля пружності від кута розкриття тріщини для однонаправленого волокнистого склопластику

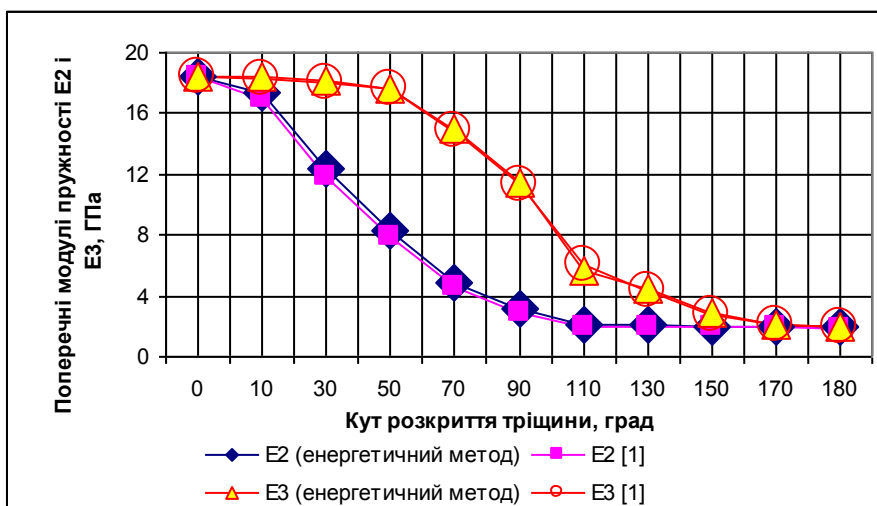


Рис. 7. Залежність поперечних модулів пружності від кута розкриття тріщини для однонаправленого волокнистого склопластику

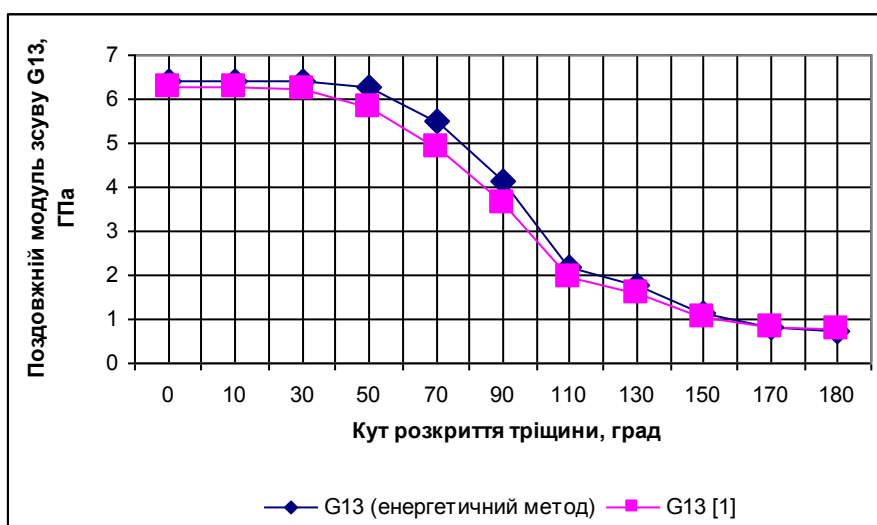


Рис. 8. Залежність поздовжнього модуля зсуву від кута розкриття тріщини для однонаправленого волокнистого склопластику

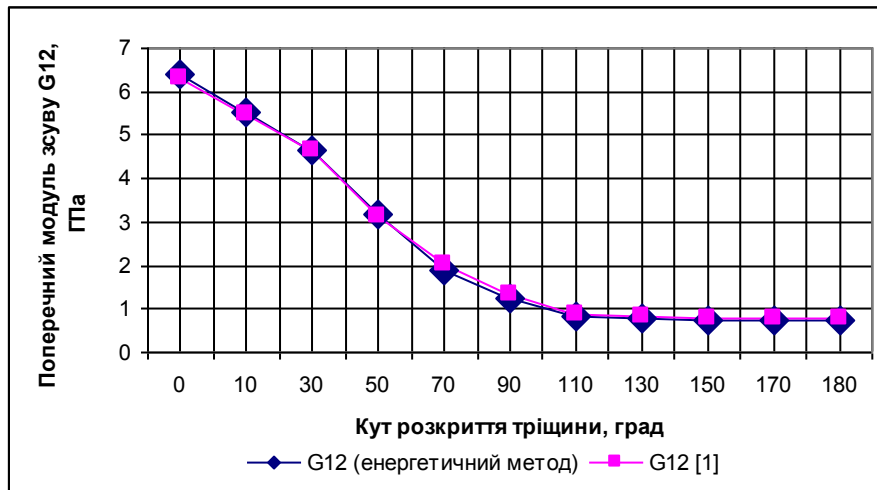


Рис. 9. Залежність поперечного модуля зсуву від кута розкриття тріщини для однонаправленого волокнистого склопластику

Як видно з наведених результатів, зі збільшенням величини тріщини значення компонент дійсної частини матриці модулів поступово зменшуються (рис. 4), а значення декрементів коливаль, що досліджувалися, збільшуються (рис. 5), що призводить до збільшення рівня розсіяння енергії у матеріалі майже в 4 рази.

Значення поздовжнього модуля пружності при зміні кута розкриття тріщини за даними роботи [1] залишаються сталим, а за розрахунками енергетичним методом зменшуються (рис. 6). Однак при повному відшаруванні волокна від матриці значення поздовжнього модуля лише на 1,33% менше від значення для матеріалу з ідеальною адгезією, розраховані за енергетичним методом. Одержаний результат свідчить про те, що поява міжфазних тріщин майже не впливає на міцність матеріалу в поздовжньому напрямку. Однак це не є характерним для напрямку впоперек волокна, оскільки поперечні модулі пружності зі збільшенням кута розкриття тріщини зменшуються (рис. 7-8), і при повному відшаруванні волокна від матриці значення модулів зменшується в 9,2 разів у порівнянні з варіантом з ідеальною адгезією.

Значення поздовжнього і поперечного модулів зсуву при збільшенні тріщини зменшуються, і відсутність контакту між волокном і матрицею може привести до зменшення поздовжнього і поперечного модулів зсуву в 8,5 разів [7].

Висновки

Одержані результати свідчать про істотний вплив розмірів тріщин на ефективні динамічні характеристики в'язкопружних композиційних матеріалів, зокрема:

- збільшення кута розкриття тріщини призводить до збільшення рівня розсіяння енергії в композиційному матеріалі. При повному відшаруванні волокна від матриці рівень розсіяння енергії збільшується в 4 рази;
- відсутність контакту між волокном і матрицею в основному впливає на зміну поперечних характеристик армованого матеріалу. При повному відшаруванні волокна від матриці значення поперечних модулів пружності зменшуються в 9,2 разів у порівнянні з варіантом з ідеальною адгезією;
- значення модулів зсуву при відсутності контакту між волокном і матрицею зменшуються в 8,5 разів у порівнянні з матеріалом без тріщин;
- розраховані значення пружних характеристик за енергетичним методом майже не відрізняються від точних і наближених розв'язків робіт [1, 2], максимальне відхилення складає 1,7%.

Необхідно зазначити, що наведені результати стосуються представницького елемента об'єму композиційного матеріалу. При узагальненні результатів на весь об'єм композиційного матеріалу необхідно вводити в розрахунки показник, який характеризує відсоток волокон з тріщинами саме такої конфігурації.

Список використаних джерел

1. Ванин Г.А. Устойчивость оболочек из армированных материалов / Ванин Г.А. – К.: Наукова думка, 1978. – 212 с.
2. Ванин Г.А. Микромеханика композиционных материалов / Ванин Г.А. – К.: Наукова думка, 1985. – 304 с.
3. Фудзии Т. Механика разрушения композиционных материалов / Т. Фудзии, М. Дзако. – М.: Мир, 1982. – 232 с.
4. Забашта В.Ф. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения: справочник / В.Ф. Забашта, Г.А. Кривов, В.Г. Бондарь. – К.: Техніка, 1993. – 160 с.
5. Победря Б.Е. О точности эффективных характеристик в механике композитов / Победря Б.Е. // Механика композитных материалов. – 1990. – № 3. – С. 408–413.
6. Дубенець В.Г. Визначення ефективних характеристик в'язкопружних композиційних матеріалів, армованих волокнами / Дубенець В.Г., Яковенко О.О. // Проблеми прочності. – 2009. – № 4. – С. 124–132.
7. Титов В.А. Определение эффективных упругих характеристик композитов с несовершенным контактом компонентов / Титов В.А., Злочевская Н.К. // Вісник НТУУ „КПІ”. Механіка. – 2005. – № 59. – С.276-279.