

**Т.І. Коменда, А.М. Коровицький, О.О. Горбатко**  
**МОРФОМЕТРИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕКСТИЛЬНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**  
**ЗІ СКЛЯНИМИ ВОЛОКНАМИ**

*Проведено морфометричні дослідження текстильних композиційних матеріалів PLAIN-структури армування зі скляними волокнами з використанням програмного комплексу MIMAS.*

*Ключові слова: морфометричні дослідження, текстильні композиційні матеріали, скляні волокна.*

*Рис. 8. Табл. 2. Літ. 12.*

**Т.И. Коменда, А.М. Коровицкий, О.О. Горбатко**  
**МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕКСТИЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ**  
**МАТЕРИАЛОВ СО СТЕКЛЯННЫМИ ВОЛОКНАМИ**

*Проведены морфометрические исследования текстильных композиционных материалов PLAIN-структуры армирования с стеклянными волокнами с использованием программного комплекса MIMAS.*

*Ключевые слова: морфометрические исследования, текстильные композиционные материалы, стеклянные волокна.*

**T.I. Komenda, A.M. Korovizkij, O.O. Gorbatko**  
**MORPHOMETRIC INVESTIGATIONS OF TEXTILE COMPOSITE MATERIALS**  
**WITH GLASS FIBERS**

*Morphometric investigations of textile composite materials with PLAIN-structure reinforcement and glass fibers with software MIMAS are conducted.*

*Keywords: morphometric investigations, textile composite materials, glass fibers.*

**Постановка проблеми.** Текстильні композиційні матеріали використовуються в багатьох галузях виробництва, зокрема, при виготовленні обшивок транспортних і літальних конструкцій. При проектуванні елементів конструкцій з композиційних матеріалів в багатьох випадках постає проблема зниження рівня вібрацій, а, отже, збільшення рівня розсіяння енергії. Збільшення розсіяння енергії в композиційних матеріалах досягається зміною багатьох факторів форми, зокрема, структури армування і зміни властивостей окремих складових. Властивості текстильного композиційного матеріалу залежать від товщини волокон, їх кількості в одному шарі, товщини шару, їх геометричного розміщення і інших структурних характеристик [1].

Оскільки композиційні матеріали складаються як мінімум із двох фаз із різними властивостями (пружними, пластичними, пружно-пластичними, в'язкопружними та ін.), не існує єдиної моделі чи методу, які дозволяють описати характеристики матеріалів із урахуванням особливостей складових і структури, виду напруженого стану та інших умов [2]. При дослідженні властивостей КМ виникають труднощі їх математичного опису, пов'язані з анізотропією і неоднорідністю структури матеріалу. Це робить проблему вивчення характеристик КМ значно складнішою, ніж для звичайних однорідних матеріалів, оскільки кількість незалежних характеристик, що досліджуються, зростають відповідно до типу анізотропії.

Важливим фактором, що впливає на вихідні характеристики матеріалу, є можливість корегування структури на етапах розробки і проектування. Зміна структурних параметрів окремих складових значно впливає на ефективні характеристики всього матеріалу. Для дослідження характеристик композиційних матеріалів можна використати експериментальні і теоретичні методи [3]. Експериментальні методи доцільно використовувати для конкретного виду матеріалу. Результати таких досліджень певної групи композиційних матеріалів, крім використання для підтвердження або спростування результатів, одержаних за допомогою теоретичних методів розрахунку, застосовуються також в якості вихідних даних при проектуванні реальних конструкцій і контролю якості матеріалів [4].

Найбільш поширеним шляхом дослідження властивостей композиційних матеріалів є створення моделей і методів розрахунку за допомогою математичного апарату з використанням властивостей компонентів матеріалу, які дозволяють врахувати структурні особливості і вид напружено-деформованого стану. Використання теоретичних методів для визначення характеристик композиційного матеріалу є виправданим, коли неможливо провести експериментальні дослідження внаслідок складності виконання ряду умов [3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** При визначенні властивостей КМ використовується поняття ефективних характеристик, застосування яких дозволяє перейти від неоднорідного середовища до однорідного за допомогою одного із методів осереднення структури з урахуванням відповідних властивостей складових. Точність значень ефективних характеристик залежить від точності знайдених усереднених тензорів напружень і деформацій [5]. Врахувати складні граничні умови, структурну неоднорідність і реальний розподіл напружень і деформацій в матеріалі можна за допомогою чисельних методів розрахунку, зокрема за допомогою методу скінченних елементів.

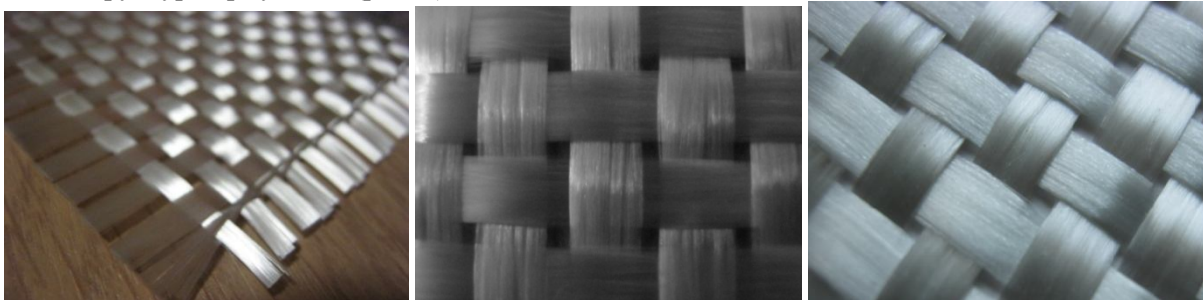
Для дослідження властивостей і побудови скінченно-елементної моделі текстильних композиційних матеріалів будь-якої структури армування необхідним фактором є максимальне наближення моделі до реального матеріалу. Таке наближення, окрім врахування усереднених тензорів напружень і деформацій, можливе за умови максимального точного наближення до структури реального матеріалу, тобто за умови врахування точних значень геометричних розмірів шару армуючого матеріалу, товщини волокон і ін. [6]. Такі дані можна дослідити, маючи реальний композиційний матеріал. Однак, в багатьох випадках вимірювання точних геометричних розмірів матеріалу за допомогою звичайних контактних методів є неможливим внаслідок малих розмірів складових матеріалу. В таких випадках використання неруйнівних методів разом зі спеціальними програмними комплексами є значно виправданим, оскільки при цьому не порушується реальна структура матеріалу [7].

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Одним із програмних комплексів, який дозволяє провести морфометричні дослідження будь-якого виду матеріалу без зміни структури, є MIMAS (Mikrooptik Image Analysis Software). Після проведення таких досліджень у будь-якому скінченно-елементному програмному продукті можна побудувати моделі текстильних композиційних матеріалів, виділивши представницькі елементи об'єму з усього матеріалу. Для текстильних композиційних матеріалів таких моделей можна виділити декілька [8, 9]. Побудовані скінченно-елементні моделі дозволяють визначити вихідні механічні і інші характеристики композиційних матеріалів.

**Мета статті.** Метою даної роботи є проведення морфометричних досліджень текстильних композиційних матеріалів PLAIN-структури армування зі скляними волокнами, а також об'ємне відтворення і побудова скінченно-елементних моделей таких матеріалів за допомогою програмних комплексів MIMAS і ANSYS.

#### **Виклад основного матеріалу.**

Існує велика кількість текстильних композиційних матеріалів різної структури армування і різними видами волокон. Розглянемо текстильний армуючий матеріал зі скляними волокнами PLAIN-структури армування (рис. 1).



*Рис. 1. Армуючий матеріал зі скловолокон PLAIN-структури армування*

В такому матеріалі волокна з круговою формою поперечного перерізу малого діаметру (~5-10 мкм) (рис.2, а, фото за допомогою цифрового мікроскопу) поєднані в окремі шари, які «переплетені» між собою (рис. 2, б).

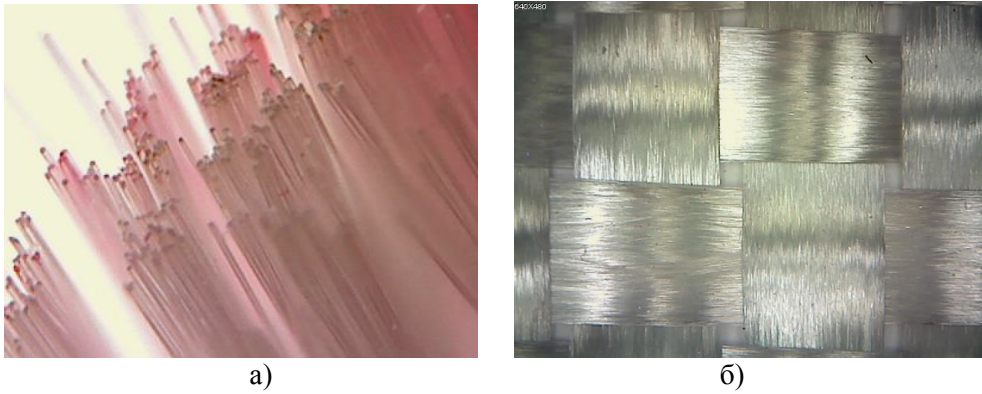


Рис. 2. Структура скляних волокон (а) і шарів (б) текстильного композиційного матеріалу

Для побудови скінченно-елементної моделі композиційного матеріалу з такими армуючими шарами необхідно знати точні розміри товщини одного шару матеріалу, ширину шару, відстань між сусідніми шарами, коефіцієнт армування і властивості складових. Використаємо для досліджень програмний комплекс MIMAS, v.4.2.0 (рис. 3).

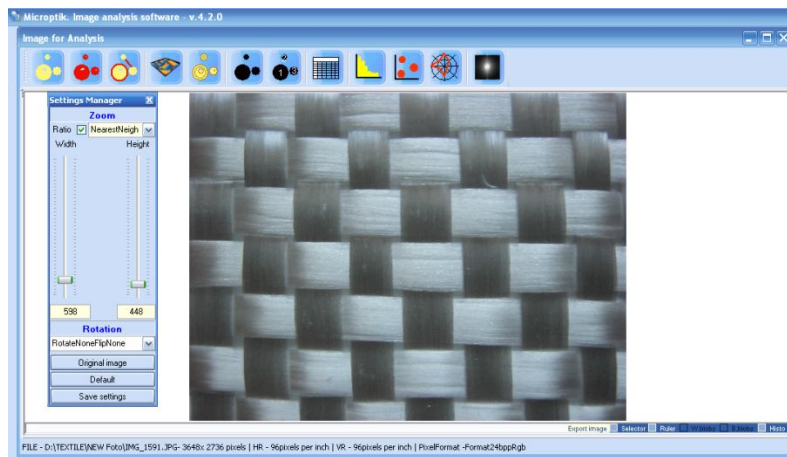


Рис. 3. Робоче вікно програмного комплексу MIMAS

Розглянемо зразки армуючого матеріалу з вимірювальною (тарувальною) шкалою. Для використання програмного комплексу MIMAS необхідно мати цифрові фото матеріалу зі шкалою, з якими надалі проводяться дослідження (рис. 4).

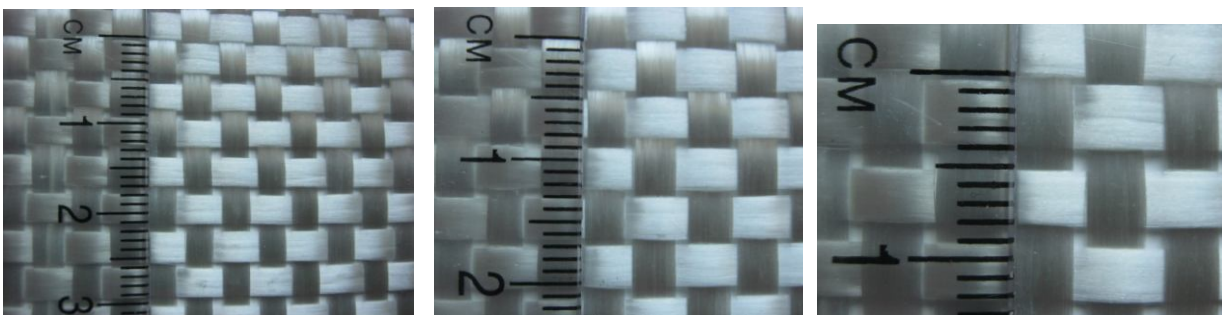


Рис. 4. Зразки текстильного матеріалу з вимірювальною шкалою

Обираємо декілька фото матеріалу з різним ступенем наближення. Задаємо за тарувальною шкалою відрізок, з яким будемо звіряти подальші вимірювання. За шкалою це відрізок 10 мм (1 см) (рис 5,а). Далі проводимо вимірювання ширини одного шару матеріалу по горизонталі і вертикалі, а також відстань між сусідніми шарами матеріалу по вертикалі і горизонталі (рис. 5, б).



Рис. 5. Тарувальний відрізок (а) і вимірювання відстаней (б) на текстильному армуючому матеріалі

Після вимірювання необхідних геометричних розмірів шарів будуюмо 3D (об'ємне) зображення армуючого матеріалу (рис. 6). Таке зображення використовуємо для визначення кута вигину, товщини шарів і коефіцієнту армування.

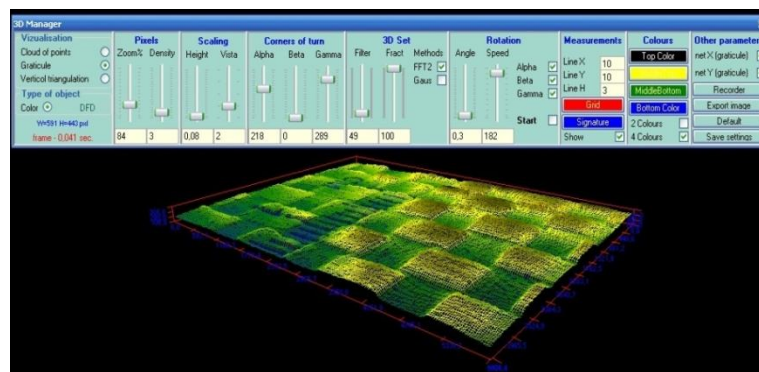


Рис. 5. Відтворена 3D-модель (об'ємна модель) текстильного армуючого матеріалу PLAIN-структури армування

Після проведення вимірювань для зразків матеріалів з декількома ступенями наближення, одержуємо значення властивостей шарів скляних матеріалів – табл. 1 [1].

Таблиця 1. Властивості шарів скляних волокон

Властивість	Значення
Середня товщина одного шару волокон	0,34 мм
Коефіцієнт армування	0,45
Середня ширина одного шару волокон	3,4 мм
Середня відстань між сусідніми шарами волокон	0,7 мм

Властивості текстильного композиційного матеріалу вказано в табл. 2.

Таблиця 2. Властивості складових текстильного композиційного матеріалу

Матеріал	Модуль Юнга E, МПа	Коефіцієнт Пуассона	Декремент коливаль
Скляні волокна	73	0,22	0,0036
Матриця – епоксидна смола (марка Aradur 5052)	3,35	0,35	0,2

Інші геометричні розміри, що необхідні для побудови скінченно-елементних моделей текстильного композиційного матеріалу PLAIN-структури армування вказано на рис. 6.



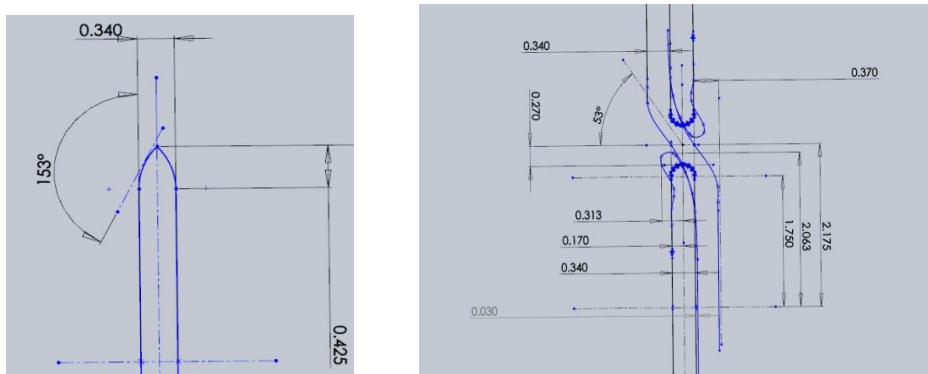


Рис. 6. Геометричні розміри шарів текстильного армуючого матеріалу зі скляних волокон

Для побудови скінченно-елементних моделей текстильного композиційного матеріалу PLAIN-структури армування зі скляними волокнами використовуємо програмний комплекс ANSYS, v.9.0.

Виділимо з матеріалу три варіанти представницького елемента об'єму, періодичне повторення яких відтворює дійсну структуру композиційного матеріалу. Це три симетричні варіанти, які пропонують використовувати для визначення механічних властивостей в роботах [8-11] (рис. 7).

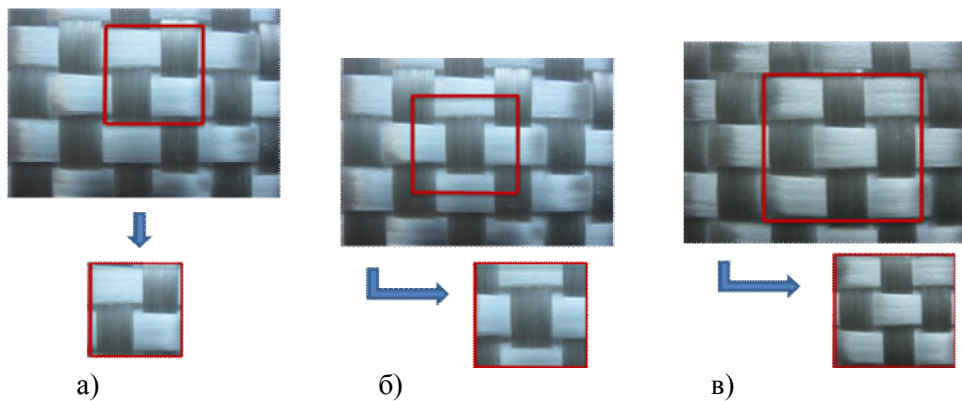


Рис. 7. Перший (а), другий (б) і третій (в) симетричні варіанти представницького елемента об'єму текстильного композиційного матеріалу PLAIN-структури армування

**Результати досліджень.** Моделі армуючого матеріалу PLAIN-структури армування текстильного композиційного матеріалу для трьох симетричних варіантів представницького елемента об'єму, побудовані в програмному комплексі ANSYS, показано на рис. 8.

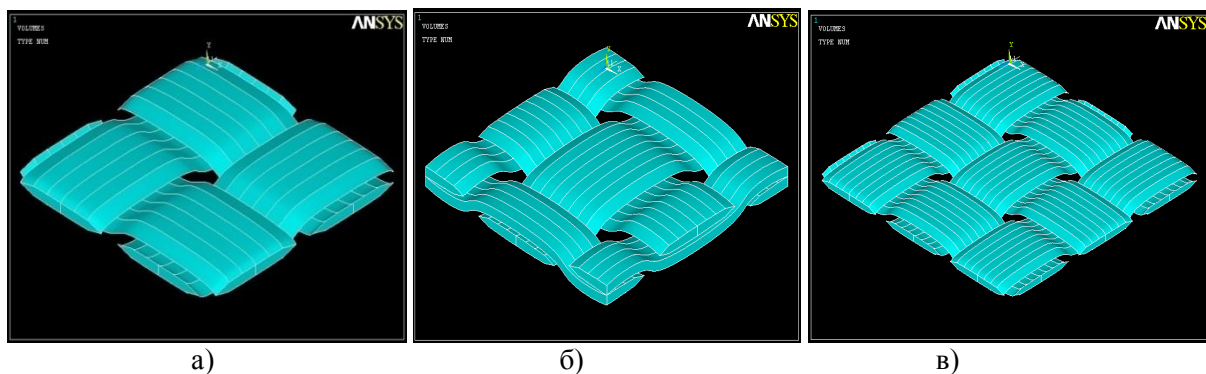


Рис. 8. Моделі армуючого матеріалу PLAIN-структури армування для першого (а), другого (б) і третього (в) симетричних варіантів представницького елемента об'єму, побудовані в програмному комплексі ANSYS

Апроксимуємо переміщення в елементах за допомогою методу скінченних елементів, використовуючи у кожному конкретному випадку відповідні до структури матеріалу і напруженого стану види елементів.

Для побудови скінченно-елементних моделей з бібліотеки програмного комплексу ANSYS використано 6-вузловий плоский скінченний елемент (варіант плоскої деформації) і 10-вузловий об'ємний скінченний елемент (варіант об'ємної деформації) (рис. 9).

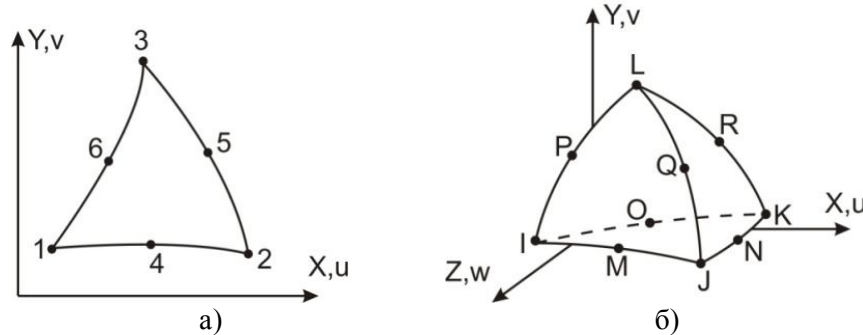


Рис. 6. Види скінченних елементів: а) 6-вузловий плоский скінченний елемент і б) 10-вузловий об'ємний скінченний елемент

Після додавання до армуючого матеріалу матриці, одержуємо шар текстильного композиційного матеріалу, модель якого з розбиттям на скінченні елементи показано на рис. 8, а. Вважатимемо, що забезпечуються умови неперервності поля вектора переміщень по об'єму елемента, а на поверхні розділу між суміжними елементами – умови неперервності поверхневих сил і переміщень. Моделюючи в такому елементі деформації (рис. 8, б) і одержуючи поля напружень (рис. 8, в), використовуючи енергетичний метод [12], можна одержати ефективні динамічні характеристики такого композиційного матеріалу (компоненти матриці комплексних модулів, декременти коливаль, модулі Юнга).

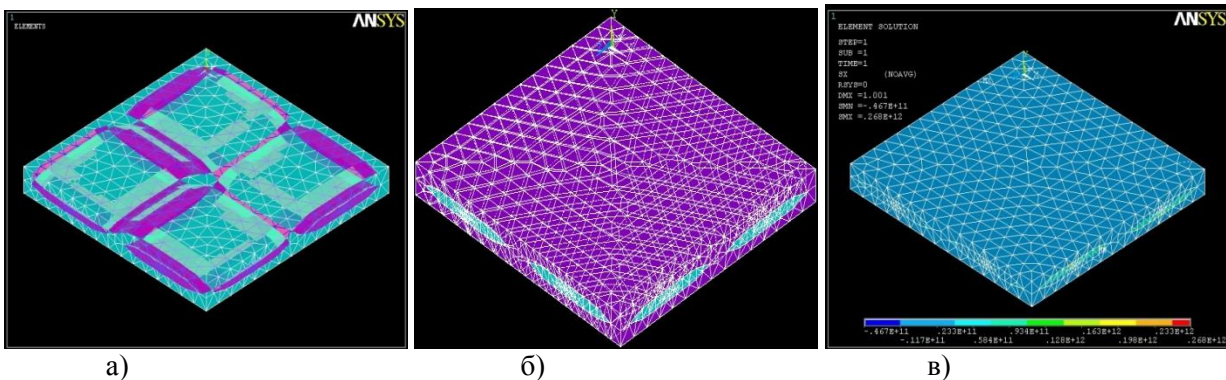


Рис. 8. Модель шару текстильного матеріалу (а), моделювання деформацій (б) і визначення напружень (в) у текстильному композиційному матеріалі PLAIN-структури армування у програмному комплексі ANSYS

**Висновки.** За допомогою програмного комплексу MIMAS було проведено морфометричні дослідження армуючого матеріалу зі скляними волокнами PLAIN-структури армування, зокрема, визначено середню ширину одного шару матеріалу по горизонталі і вертикалі і середню відстань між сусідніми шарами матеріалу по вертикалі і горизонталі. Побудовано 3D (об'ємну) модель шару армуючого матеріалу і визначено товщину одного шару матеріалу, товщину всього армуючого матеріалу, куту вигину шару матеріалу, коефіцієнт армування.

За знайденими геометричними розмірами за допомогою програмного комплексу ANSYS побудовано моделі армуючого матеріалу PLAIN-структури армування для трьох симетричних варіантів представницького елемента об'єму, а також скінченно-елементні моделі шару текстильного матеріалу. За допомогою таких моделей проведено моделювання деформацій і визначено поля напружень в текстильному композиційному матеріалі.

1. Mahmood A., Wang X., Zhou C. Elastic Analysis of 3D Woven Orthogonal Composite // Journal of IEEE, 2011. – Vol.3. – PP.757-761.
2. Сендецьки Дж. Упругие свойства композитов / Дж. Сендецьки // Композиционные материалы. – М.: Мир, 1978. – Т. 2. – С. 196–241.
3. Композиционные материалы в технике / [под ред. Д.М. Карпиноса]. – К.: Техніка, 1985. – 152 с.
4. Whitney J.M. Analytical and Experimental Methods in Composite Mechanics // Journal of the Structural Division. – 1973. – № 1. – P. 113–129.
5. Победря Б.Е. О точности эффективных характеристик в механике композитов // Механика композитных материалов. – 1990. – № 3. – С. 408–413.
6. Sherburn M. Geometric and Mechanical Modelling of Textiles. – Nottingham: University of Nottingham, 2007. – 271 p.
7. Бардзокас Д.И. Математическое моделирование физических процессов в композиционных материалах периодической структуры / Д.И. Бардзокас, А.И. Зобнин. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 376 с.
8. Композиционные материалы: Справочник / [под. общ. ред. В.В. Васильева]. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
9. Pilkington L.O. Impact Response and Failure of a Textile Composite Fuselage Frame. – Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute, 2004. – 108 p.
10. Мунгалов Д.Д., Креггерс А.Ф. Определение деформативных свойств пространственно-плетеного композитного материала. 1. Теоретическая модель // Механика композитных материалов. – 1990. – № 5. – С. 795–802.
11. Textile composites: modeling strategies // Composites. – 2001. – Vol.32. – PP. 1379-1394.
12. Дубенець В.Г., Яковенко О.О. Визначення ефективних характеристик в'язкопружних композиційних матеріалів, армованих волокнами // Проблеми прочности. – 2009. – № 4. – С. 124–132.

Стаття надійшла до редакції 14.06.2013.