

Дослідження впливу нерівномірного розподілу волокон на механічні властивості композитів на основі воксельних моделей

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.091>

Владислав Жихарєв

Аспірант кафедри математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
м. Харків, Україна
vladyslav.zhykhariev@infiz.khpi.edu.ua

Сергій Місюра

Доцент кафедри математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
м. Харків, Україна
serhii.misiura@khpi.edu.ua

Марія Шаповалова

Доцент кафедри математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
м. Харків, Україна
Mariia.Shapovalova@khpi.edu.ua

Олексій Водка

Доцент кафедри математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
м. Харків, Україна
oleksii.vodka@khpi.edu.ua

Анотація— У роботі представлено результати чисельного та експериментального дослідження впливу нерівномірного розподілу волокон у волокнистих композитах. Для моделювання нерівномірного розподілу використано нормальний (гаусів) розподіл із рівнями зміщення 5%, 10% та 15% відносно ідеальної гексагональної структури. Проведені чисельні розрахунки дозволили оцінити вплив статистичних відхилень мікроструктури на пружні характеристики композиту. Додатково застосовано методи комп'ютерного зору для аналізу мікрофотографій реальних композитів, що дало змогу порівняти результати моделювання з реальною структурою матеріалів.

Ключові слова — волокнисті композити; нерівномірний розподіл; пружні властивості; чисельне моделювання; комп'ютерний зір.

I. ВСТУП

Поведінка волокнистих композитів значною мірою визначається просторовим розподілом волокон у матриці. Ідеальні регулярні структури часто використовуються в аналітичних та чисельних моделях [1], проте в реальних матеріалах відхилення від такої організації є неминучими через технологічні особливості виготовлення, неоднорідність матеріалу та випадкові дефекти. Такі відхилення призводять до формування локальних зон концентрації напружень, що впливає на однорідність механічних властивостей, міцність та довговічність композиту [2]. Тому для реалістичного прогнозування поведінки матеріалу необхідно враховувати мікроструктурні нерівномірності та випадкові зміщення волокон.

У цьому дослідженні зосереджено увагу на впливі нерівномірного розташування волокон на розподіл механічних характеристик композиту. Для

моделювання було розроблено чисельну воксельну модель, у якій положення центрів волокон задавалося за гаусівським законом. Такий підхід дозволяє імітувати реальні відхилення від регулярної структури та дослідити їхній вплив на локальні та макроскопічні властивості матеріалу. Отримані чисельні результати порівнювалися з експериментальними даними, отриманими з мікрофотографій реальних зразків за допомогою методів комп'ютерного зору [3-5], що забезпечує верифікацію моделі та підвищує достовірність прогнозів механічної поведінки композиту.

II. ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Для дослідження була розроблена чисельна модель, що дозволяє дискретизувати матеріал на об'ємні елементи (вокселі), кожен з яких характеризується механічними властивостями відповідної фази — волокна або матриці.

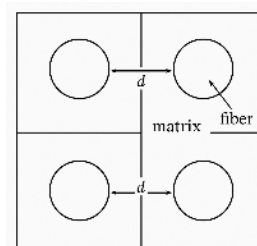


Рис.1 Схема композитного матеріалу з регулярним та симетричним розташуванням волокон

Модель розглядає мікрочастину композиту, що включає декілька волокон у матриці, яка виступає як базовий елемент для аналізу локальної поведінки матеріалу. Для відтворення реалістичної структури

волокон у моделі їхні координати задаються із випадковими зміщеннями від періодичного розташування відповідно до нормального (гаусівського) розподілу:

$$x' = x_0 + \Delta x, \Delta x \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2) \quad (1)$$

$$y' = y_0 + \Delta y, \Delta y \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2) \quad (2)$$

x_0, y_0 — координати ідеального розташування волокон,

$\Delta x, \Delta y$ — випадкові зміщення, що підкоряються нормальному (гаусівському) розподілу $\mathcal{N}(0, \sigma^2)$,

σ — стандартне відхилення, що задає рівень нерівномірності розподілу волокон.

Вибір різних значень σ дозволяє моделювати різні рівні нерівномірності розподілу волокон у мікрочастині композиту.

Було проведено серію чисельних експериментів із різними параметрами випадкових відхилень, що дало змогу виявити залежність між величиною випадкових відхилень у розташуванні волокон і рівномірністю механічної відповіді матеріалу.

Такий підхід дозволяє ефективно інтегрувати чисельні результати з експериментальними даними, отриманими з мікрофотографій реальних зразків композиту, та підвищує достовірність прогнозів механічної поведінки матеріалу.

III. АНАЛІЗ МІКРОСТРУКТУРИ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

Для співставлення чисельних моделей із реальними зразками композитів було розроблено методику кількісного аналізу мікрофотографій на основі комп'ютерного зору. Основна мета — визначити точні координати центрів волокон, середні діаметри та просторову концентрацію, а потім порівняти реальне розташування волокон із аналітичним (регулярним) розподілом.

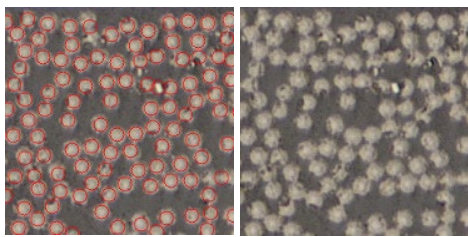


Рис.2 Приклад роботи комп'ютерного зору – виявлення об'єктів (ліворуч: з позначками; праворуч: оригінальне зображення мікроструктури)

За допомогою цього підходу виконуються такі завдання:

- Виявлення центрів волокон у мікрофотографіях для подальшого статистичного аналізу;
- Вимірювання середнього діаметра волокон для оцінки геометричної однорідності матеріалу;
- Оцінка концентрації волокон у відсотках від площі аналізованої ділянки, що дозволяє

кількісно визначити щільність волокон у реальному зразку;

- Порівняння реального та аналітичного розподілу волокон, що дає змогу розрахувати рівень нерівномірності в реальній мікроструктурі.

Отримані дані дозволяють кількісно оцінити відхилення реальної структури композиту від регулярної, що є критично важливим для уточнення параметрів воксельної чисельної моделі та коректного прогнозування локальних концентрацій напружень. Таким чином, цей метод забезпечує об'єктивне порівняння синтетичних і реальних мікроструктур, підвищуючи точність моделювання механічної поведінки композитів.

Висновки

Проведені дослідження показали, що навіть незначні випадкові зміщення волокон у межах 5–15% від міжволоконної відстані здатні впливати на локальні концентрації напружень та на ефективні механічні характеристики композиту. Використання чисельних воксельних моделей дозволило оцінити залежність однорідності матеріалу від рівня нерівномірності розподілу волокон, що є ключовим для прогнозування його міцності та довговічності.

Застосування методів комп'ютерного зору дало змогу кількісно оцінити реальне розташування волокон, визначити середні діаметри та координати центрів, а також порівняти реальні мікроструктури із синтетичними (модельними). Таке порівняння є важливим етапом валідації чисельної моделі, дозволяючи уточнювати параметри розподілу волокон і підвищувати достовірність прогнозів механічної поведінки композиту.

Таким чином, поєднання воксельного моделювання та методів комп'ютерного зору створює ефективний інструментарій для кількісного аналізу мікроструктури та оптимізації механічних характеристик волокнистих композитів.

Література

- [1] F. Yildirim, "Micromechanical modeling of basalt fiber and glass fiber reinforced PA66 matrix composite materials," *Uludağ Univ. J. Fac. Eng.*, vol. 30, no. 1, pp. 87–106, 2025.
- [2] D. Micota, A. Isincu, and L. Marsavina, "Micromechanical modeling of glass fiber reinforced plastic material," *Mater. Today: Proc.*, vol. 45, no. 5, pp. 4330–4336, 2021.
- [3] K. Alrfou, A. Kordijazi, et al., "Computer vision methods for the microstructural analysis of materials: The state-of-the-art and future perspectives," *arXiv:2208.04149*, 2022.
- [4] B. L. DeCost and E. A. Holm, "A computer vision approach for automated analysis and classification of microstructural image data," *Comput. Mater. Sci.*, vol. 110, pp. 126–133, 2015.
- [5] J. Cheng, et al., "Computer vision analysis on material characterization images," *Adv. Intell. Syst.*, vol. 4, no. 2, p. 2100158, 2022.