

МОДЕЛЮВАННЯ ПОРИСТИХ МЕТАМАТЕРІАЛІВ ЗА ПРИНЦИПАМИ ВОРОНОГО-ДЕЛОНЕ

¹Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України,

²Вінницький національний технічний університет

Анотація

Робота присвячена моделюванню пористих метаматеріалів із застосуванням принципів Вороного-Делоне. Розглянуто алгоритм інверсного проектування, що дозволяє мінімізувати об'ємну вагу (ОВ) матеріалу, оптимізуючи його внутрішню структуру. Описано послідовність комп'ютерного моделювання та адитивного виготовлення тривимірних виробів із пористою структурою.

Ключові слова: пористі метаматеріали, адитивне виробництво, мінімальна поверхня, Вороного-Делоне, скелетний граф, 3D-друк, цифрове моделювання.

У 2020-х роках з'явився новий клас матеріалів – метаматеріали, які не існують у природі, але демонструють виняткові властивості. Їх характеристики визначаються не хімічним складом, топологічно-геометричними параметрами внутрішньої структури. Одним із ключових методів створення таких штучних матеріалів став 3D-друк, що забезпечує перетворення цифрової моделі у фізичну конструкцію (digital-to-physical conversion). Особливе значення має об'ємна вага (ОВ, bulk density), яка визначає механічні властивості пористих структур метаматеріалу. Навіть пінополістирол (ППС), розроблений у США в 1941 році, може бути класифікований як метаматеріал, оскільки його механічні характеристики залежать не лише від складу, а й від внутрішньої структури.

Компанія Spherene Inc. (Швейцарія, CEO С. Waldvogel) розробила нову геометрію метаматеріалу, натхненну коралоподібними природними структурами. Вона базується на принципах Вороного-Делоне та мінімальних поверхнях, що дозволяють мінімізувати ОВ матеріалу [1]. Для цього компанія використала інверсні сфери, які отримали назву сферени («spherenes») [2]. Ця структура забезпечує оптимальний розподіл матеріалу, зменшуючи масу без втрати механічної міцності. Такий підхід дозволив створювати адаптивні пористі метаматеріали, що поєднують легкість, міцність та ефективність використання ресурсу.

В описі [1] показано послідовність адитивного комп'ютерного моделювання та 3D-виготовлення тривимірних виробів з пористою структурою (з мінімальною поверхнею) із застосуванням геометричних принципів Вороного-Делоне.

1) Комп'ютер реєструє обриси зовнішньої поверхні виробу, формуючи так званий «конверт» (зовнішню межу моделі).

2) Генерується поле об'ємної ваги (ОВ) по всьому об'єму виробу відповідно до заданих дизайнером числових значень ОВ, що відповідають локальним вимогам до фізичних параметрів.

3) Виконується адаптивна теселяція Вороного: об'єм виробу розбивається на багатогранники (мозаїку), використовуючи поле ОВ.

4) Генерується перший скелетний граф, пов'язаний з адаптивною теселяцією Вороного.

5) Виконується тетраедризація Делоне, формуючи другий скелетний граф, пов'язаний із першим.

6) Генерується цифрова модель мінімальної поверхні на основі скелетних графів і зберігається у CAD-форматі.

7) 3D-принтер здійснює адитивне виготовлення тривимірних виробів з мінімальною поверхнею пористої структури виробу відповідно до цифрової моделі.

Комп'ютер у процесі моделювання аналізує скелетні графи та коригує їх геометрію, чим забезпечує те, що стінки пористої серцевини з мінімальною поверхнею гарантовано перпендикулярно стикаються із зовнішньою оболонкою тривимірних виробів. Цим досягається ідеальний розподіл навантаження та зниження ризику локальних деформацій у конструкції.

На рис. 1 показано приклади металевих та полімерних (світлого кольору) друківаних виробів зі сференовою структурою, а також схема відмінності гіроїдної і сференової структур [3].

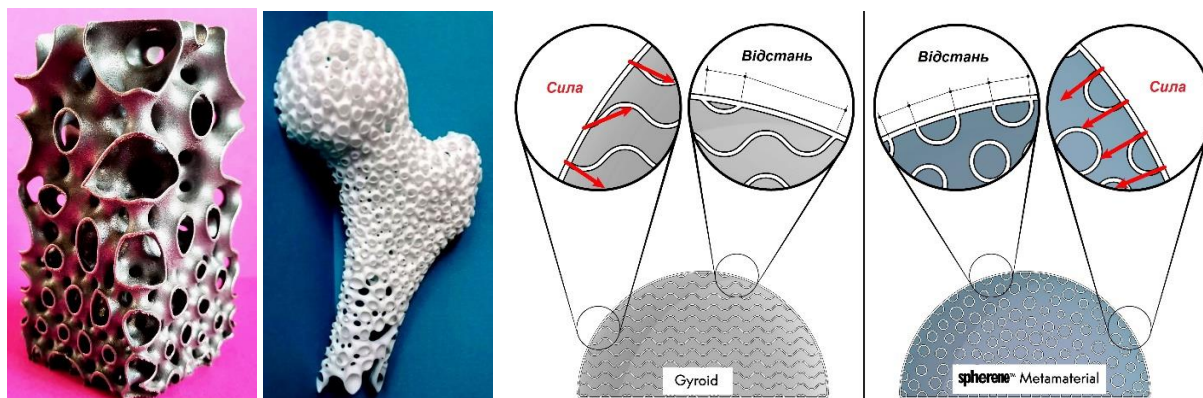


Рисунок 1 – Металевий та полімерний друківаних вироби зі сференовою структурою, а також схема відмінності гіроїдної і сференової структури при впливі силового навантаження на поверхню друківаного виробу

Розробники сференового пористого метаматеріалу не передбачали його застосування для ливарного виробництва, зокрема для разових полімерних моделей, що газифікуються (метод ЛГМ, Lost Foam process). Проте в інституті ФТІМС НАН України запропоновано друківання таких моделей з регульованою пористістю [4]. При чому ця пористість може бути з відкритими порами, тобто – транзитною. На відміну від традиційних для ЛГМ моделей із ППС, в яких пористість закрита, бо ППС має структуру печених гранул з полістиролу. Останнє дозволяє застосувати вентиляцію ливарних моделей (видалення газів) при їх газифікації в ливарній формі.

Дослідження виконано згідно з договором 226 (166/24) від 22.02.2024 про наукове співробітництво між ФТІМС НАН України та ВНТУ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Патент WO2020229692A1. Method of additively manufacturing a minimal surface structure. МПК В29С64/386 / Spherene Inc. – 2020.
2. Spherene Inc. Офіційний сайт компанії. [Електронний ресурс]. URL: <https://spherene.ch/>.
3. Kety S. The potential of metamaterials for (medical) Additive Manufacturing. 3D ADEPT Mag. March – April 2024. <https://3ddept.com/the-potential-of-metamaterials-for-medical-additive-manufacturing/>.
4. Бродовий О.В., Дорошенко В.С., Янченко О.Б. 3D-проекування пористих ливарних моделей в програмі Rhinoceros 8. Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. 2024. № 1. С. 119-126. <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2024-59-1-119-126>.

Дорошенко Володимир Степанович, доктор техн. наук, пров. наук. співр., Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ, doro55v@gmail.com.

Янченко Олександр Борисович, канд. техн. наук, доц., Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, 1961yab@gmail.com

Modeling porous metamaterials using the Voronoi-Delaunay principle

Abstract

The work is devoted to modeling porous metamaterials using Voronoi-Delaunay principles. An inverse design algorithm is considered, which allows minimizing the bulk density (BW) of the material by optimizing its internal structure. The sequence of computer modeling and additive manufacturing of three-dimensional products with a porous structure is described.

Keywords: porous metamaterials, additive manufacturing, minimal surface, Voronoi-Delaunay, skeletal graph, 3D printing, digital modeling.

Doroshenko Volodymyr Stepanovych, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Leading Researcher, Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine, Kyiv, doro55v@gmail.com.

Yanchenko Oleksandr Borisovych, PhD (Engin.), Associate Professor, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 1961yab@gmail.com.