

**3D-ГЕНЕРАЦІЯ ПОРИСТИХ СТРУКТУР ДЛЯ ДРУКУ ЛИВАРНИХ МОДЕЛЕЙ, ЩО ГАЗИФІКУЮТЬСЯ В ЛИВАРНІЙ ФОРМІ**

E-mail: doro55v@gmail.com



**АНОТАЦІЯ.** У статті розглядається використання адаптивних поверхонь мінімальної щільності (ADMS), розроблених компанією Spherene Inc., як заповнювачів для 3D-друкованих деталей. Ці структури забезпечують зниження ваги, економію матеріалів, ізотропну міцність та підвищення ефективності виробництва. Алгоритм ADMS дозволяє створювати самонесучі оболонки з геометрією перевернутих сфер, адаптовані до форми та властивостей моделі. Проведені дослідження показали перспективність використання ADMS у литті за газифікованими моделями (ЛГМ) для зменшення маси та оптимізації механічних і аеродинамічних властивостей деталей.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ADMS, мінімальні поверхні, 3D-друк, пористі моделі, лиття за газифікованими моделями.

Тривимірні періодичні мінімальні поверхні (МП), такі як гіроїд, стали звичайними елементами дизайну для 3D-друку. Однак, компанією Spherene Inc. (Швейцарія, <https://spherene.ch>) розроблено алгоритм, що створює адаптивні поверхні мінімальної щільності (Adaptive Density Minimal Surfaces, ADMS) в якості плагіну до програми заповнення тіла 3D-друкованих деталей, який можна використовувати для зменшення маси та керування властивостями матеріалу [1]. Матеріали з МП, яку компанія називає «spherenes», заснована на класі геометричних форм, якими є сфери, або, точніше, інверсні сфери. До речі, простий приклад МП – мильна плівка, яка зтягує контури різної конфігурації та набуває форми, що відповідає мінімуму енергії поверхневого натягу, яка прямо пропорційна її площі.

Використанням МП для моделювання мінімальних енергетичних станів матеріалів у фізичних моделях досягають того, що структури Spherene Inc.

рівномірно розподіляють напругу, мінімізуючи кількість використовуваного матеріалу. Приклади за методикою такого моделювання показано на рис. 1.

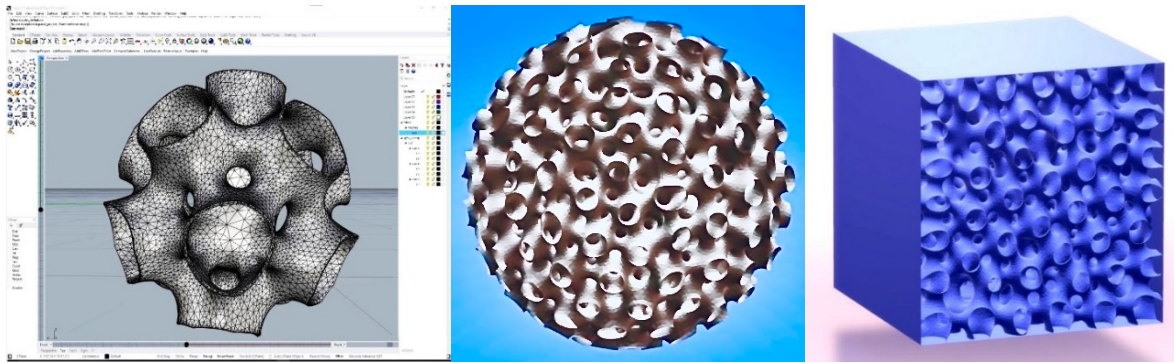


Рис. 1. Моделі структур spherenes, в тому числі в якості наповнювача для куба з гладкою поверхнею (створено в програмі з сайту <https://spherene.ch>)

Компанія Spherene Inc. алгоритм заповнення друкованих конструкцій за допомогою інверсних сфер зробила доступним через інтерфейс застосування API в програмі Rhino (Rhinoceros). На рис. 1 перше фото ліворуч та ряд інших фото нижче відтворено у вигляді скріншота з екрану, де автори статті виконали моделювання в програмі Rhinoceros 8. Алгоритм за допомогою хмарного API може заповнити проектний об'єм оболонками з поверхнею ADMS, геометрія якої повторює перевернуті сферичні поверхні для створення міцної та відкритої структури, або серцевини тіла чи стінок 3D фізичних об'єктів (рис. 2).

Сфери складають наче один безперервний оболонковий лабіринт як ідеальна форма для втримання і розподілення напружень всередині порожнього об'єму.

Засновник компанії, Крістіан Вальдвогель, після експериментів з моделями семикутників застосував заповнення простору МП з перевернутих сфер. Переваги матеріалу spherenes заявлено такі [1]:

1. Зменшення ваги. Замінює інший матеріал на заповнення заданої об'ємної ваги, зберігаючи міцність.

2. Можливість налаштування. Сфероподібну пористу «геометрію» можна поєднати з суцільними областями, щоб закрити певні об'єми, ввести отвори під гвинти чи створити внутрішні порожнини. Можна використовувати градієнти

для зменшення маси матеріалу (рис. 3), зміщення центру ваги тощо.



Рис. 2. Приклади друківаних полімерних і металевих виробів типу корала чи кістки, кронштейнів та декоративної фігурки (з сайту <https://spherene.ch>)

3. Відповідність поверхні. Сфери за своєю природою повторюють форму обмежувальної геометрії.

4. Самопідтримний. У більшості процесів 3D-друку об'єкти зі сфероподібного матеріалу можна друкувати без опорних структур.

5. Економія матеріалів. Конструкції, наповнені такими структурами, потребують менше матеріалу для друку та можуть друкуватися швидше.

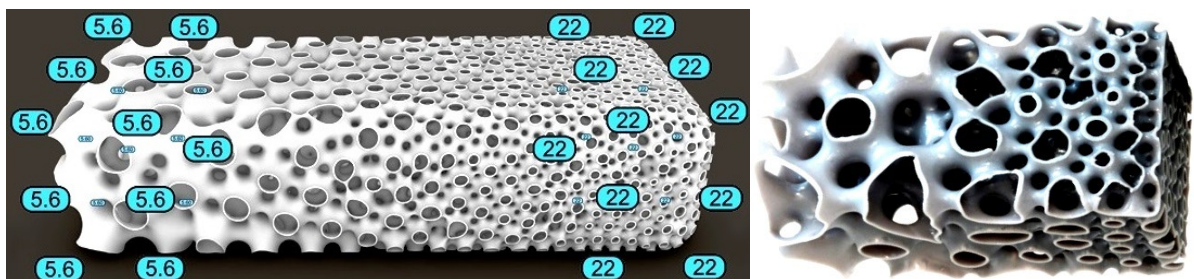


Рис. 3. Структури з градієнтом щільності (з сайту <https://spherene.ch>)

Використання Spherene API потребує, щоб користувач спочатку визначив модель у САПР, що слугує обчислювальною оболонкою, у якій генеруються оболонки сферичної геометрії. Залежно від вибору дизайнера, модель може бути заповнена сферою постійної щільності та фіксованої товщини, або може містити градієнти щільності та товщини, порожнини чи суцільні області. Спосіб, у який сферичні поверхні зустрічаються (стикуються) з конвертом (відомий як «умова конверта»), також можна контролювати. Незалежно від вхідних даних або геометричної складності оболонки, алгоритм Spherene Inc. генеруватиме ізотропну мінімальну поверхню, що складається з двох переплетених просторів [4]. Якщо цього не буде спеціально вказано, то алгоритм не створить повністю закриту форму для 3D-друку. API Spherene автоматично адаптує заповнення до вимог, встановлених користувачем, створюючи структури, схожі на корал або кістку в перерізі (рис. 2). Це означає, що користувачам не потрібно мати справу з особливостями загальної форми або маніпулювати такими параметрами, як розмір пор або товщина стінки, щоб отримати бажаний результат; замість цього вони отримують результат, виражений в термінах щільності заповнення та стану оболонки. Вищий відсоток щільності заповнення створює більше оболонкового матеріалу, який може бути використаний, наприклад, для збільшення жорсткості в певних областях, тоді як нижчу щільність може бути застосовано для забезпечення гнучкості або пружності. Алгоритм моделює матеріал автоматично.

Нерідко градієнти потрібні для створення жорсткіших окремих областей деталі. Так, можна надрукувати сталеву деталь з низькою щільністю до такої міри, що матеріал буде нагадувати алюміній, як за вагою, так і за міцністю. Економія часу та матеріалів впливає на собівартість деталі [1]. Як методика заповнення (порівняно з іншими системами, такими як TPMS і балкові решітки), ADMS від Spherene Inc. має ті переваги, що забезпечує ізотропну міцність по всьому об'єму деталі, а також сферо-похідні оболонки є самонесучими для виготовлення за допомогою більшості способів 3D-друку. За словами компанії, відповідність поверхні та контрольований стан оболонки також забезпечують бездоганну інтеграцію збірки з цими структурами [1]. Інструмент дизайну



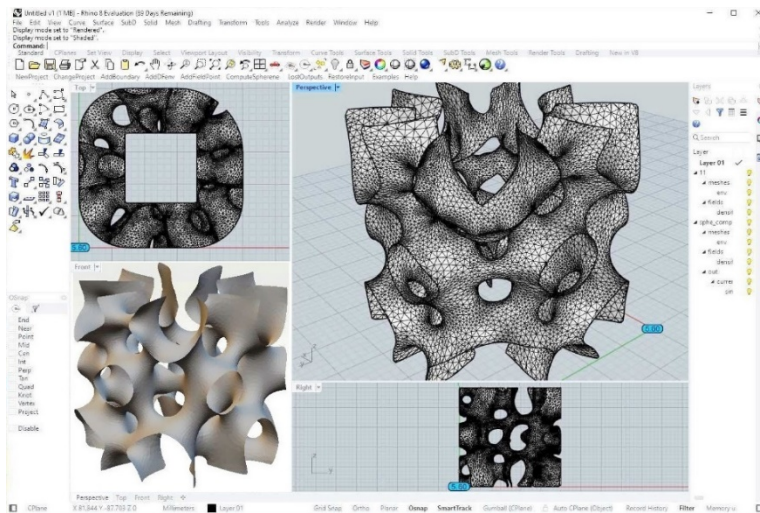
Spherene Inc. наразі загальнодоступній для тестування безкоштовно. Компанія має досвід моделювання таких галузях, як аерокосмічна промисловість, високоефективні технології, інструменти, взуття, медицина [1].

На рис. 4, а-г показано наші моделювання у програмі Rhinoceros з метою отримати друковані пористі моделі для ЛГМ-процесу.

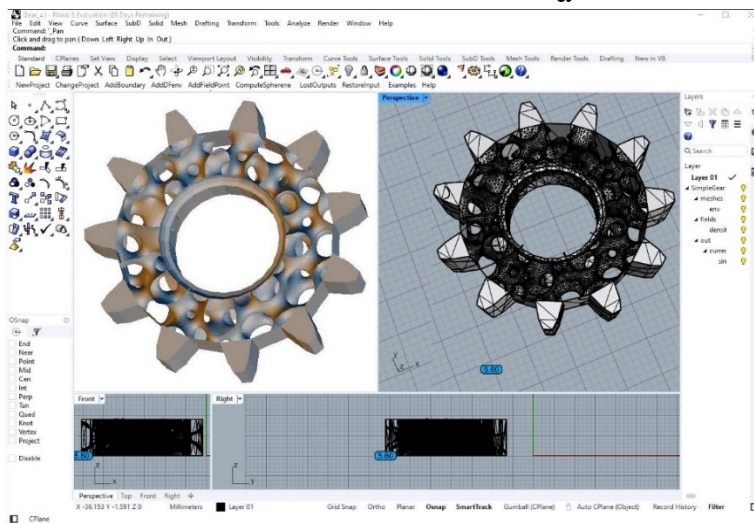
Для порівняння на рис. 4, в показано два варіанти ливарних моделей (верхній ряд) і деталей «втулка приводна» (нижній ряд), вилитих нами методом ЛГМ з чавуну СЧ200. Друковані методом FDM суцільні частини моделі (чорного кольору) для полегшення маси всієї моделі були насаджені на патрубки з пінополістиролу (ППС білого кольору). Інакше вилити литтям за друкованими моделями (що газифікуються – ЛГМ) без створення в них пористої стінки з ППС не вдавалось, бо такі спроби давали лише браковані металовироби. Наші пробні друкування з PLA на принтері «Bambu Lab A1 mini» елементів за алгоритмом ADMS (рис. 5), схожі на спрощений варіант моделей (рис. 4, а).

Виконані нами перші приклади цифрового моделювання і друкування пористих (порожнистих) ливарних моделей показали придатність використання алгоритму ADMS для зменшення маси моделей і перспективу їх застосування для ЛГМ. Наступні кроки можуть включати вибір оптимального способу їх друку, дослідження ряду можливих переваг чи функцій з огляду мінімізації маси в залежності від достатніх механічних властивостей моделі та регулювання аеродинамічних характеристик утворених вентканалів для виведення газів через верхній випор з моделі у вакуумований пісок форми, зниження коефіцієнта опору фільтрації в них газів в залежності від рівня впливу вакуумування і ступеню його силової дії на стінки піщаної форми (для забезпечення їх непорушності) та на метал, що газифікує модель, тощо.

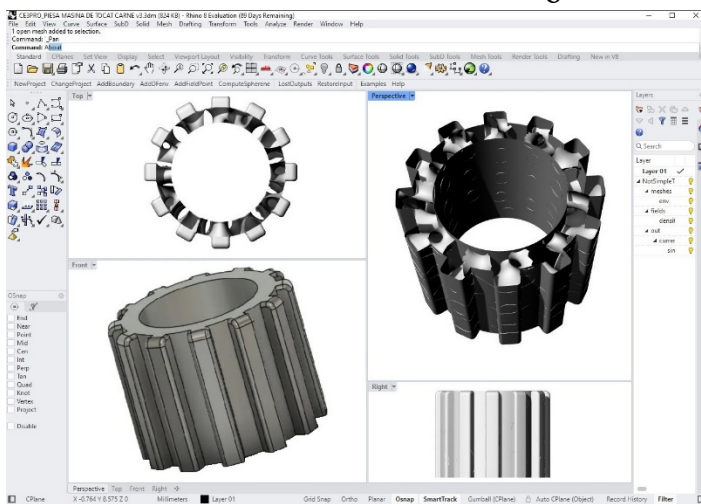
Застосування алгоритму ADMS також дозволяє моделювати структури, що оптимізовані для мінімального використання матеріалів, зберігаючи при цьому високу міцність і стабільність під час лиття. Такі структури можуть значно зменшити витрати на виготовлення моделей, а також забезпечити вищу точність та прогнозованість поведінки газів у процесі лиття, що сприяє покращенню кінцевої якості виробів.



а



б



в

г

Рис. 4. Моделі: а – заповнення оболонками простору «куб» з каналом «квадрат» і кістки; б – модель шестерні і гачка; в – модель «втулка приводна»; г – моделі і вилівки «втулка приводна» (3D-друк суцільної моделі із вставкою з ППС)

Додаткові дослідження можуть бути спрямовані на оцінку ефективності модифікованих пористих моделей в умовах різних типів вакуумування та їх впливу на якість поверхні лиття. Це включає аналіз можливих конфігурацій вентканалів, а також розробку інтегрованих систем контролю параметрів лиття з урахуванням особливостей газифікації та відведення газів. Подібні підходи відкривають нові перспективи для вдосконалення процесів ЛГМ та зниження собівартості виробництва.

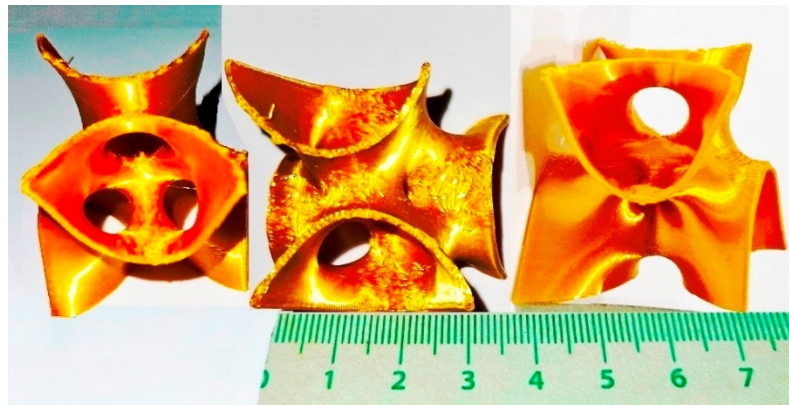


Рис. 5. Друковані елементи за алгоритмом ADMS на 3D-принтері методом FDM

Після першого етапу дослідження ЛГМ-процесу за 3D-друкованими моделями у вигляді комбінованих моделей з підкладками з ППС і друкованими поверхневими оболонками чи приєднаними окремими друкованими деталями, створюються передумови переходу до наступного етапу: моделювання і друкування оптимально спроектованих цільних пористих моделей з регульованою пористістю, до якої можливе підведення вакууму з піску форми.

Перспективи подальшого розвитку цього напрямку включають створення адаптивних моделей, які змінюють свою пористість залежно від умов вакуумування або складу газів, що виділяються. Це дозволить значно підвищити ефективність процесу і зменшити ризик дефектів у готових деталях. Крім того, впровадження машинного навчання для оптимізації структури моделей може забезпечити автоматизоване створення дизайнів, які одночасно відповідають вимогам до міцності, маси та пропускної здатності для газів.

Ще одним напрямом є дослідження впливу таких моделей на екологічність виробництва. За рахунок зниження витрат матеріалів і енергії на виготовлення форм, а також зменшення обсягів газових викидів під час лиття, цей підхід може стати ключовим для розвитку сталого ливарного виробництва. До того ж, можливість використання екологічно безпечних матеріалів для друку моделей, які легко утилізуються після використання, відкриває додаткові переваги з точки зору циркулярної економіки.

Інтеграція таких моделей у масове виробництво також може сприяти створенню ливарних форм із покращеними теплоізоляційними характеристиками. Це, у свою чергу, дозволить скоротити час охолодження металу, підвищити продуктивність процесу та забезпечити вищу однорідність структури готових деталей.

#### Література:

1. S. Hendrixson. Spherene Creates Metamaterial with Geometry Derived from Spheres. 22.02.2024. URL: <https://www.additivemanufacturing.media/search?q=Spherene%20Creates%20Metamaterial%20>.



**ABSTRACT.** The article explores the use of Adaptive Density Minimal Surfaces (ADMS), developed by Spherene Inc., as infill structures for 3D-printed components. These structures offer weight reduction, material savings, isotropic strength, and improved manufacturing efficiency. The ADMS algorithm enables the creation of self-supporting shells with inverted spherical geometry, tailored to the shape and properties of the model. Studies demonstrated the feasibility of using ADMS in Lost Foam Casting (LFC) to reduce mass and optimize the mechanical and aerodynamic properties of parts.

**KEYWORDS:** ADMS, minimal surfaces, 3D printing, porous models, lost foam casting.