

УДК 681.3:621.74:004.8:004.94

О. В. Бродовий¹, В. С. Дорошенко², О. Б. Янченко³

3D-ПРОЕКТУВАННЯ ПОРИСТИХ ЛИВАРНИХ МОДЕЛЕЙ В ПРОГРАМІ RHINOCEROS 8

¹Міжнародний ліцей «Михайл», Київ²Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ³Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. Впровадження в ливарне виробництво 3D-друку дозволяє з цифрових креслень ливарних моделей виготовляти металеві виливки нерідко зі складною геометрією, які було б складно або неможливо виготовити іншими методами. Особливо 3D-друк вигідний для лиття металу за моделями, що газифікуються (ЛГМ), в якому застосовують разові пінополімерні моделі, які випаровуються в піщаній формі від тепла металу, що заливається в цю форму. При виготовленні і застосуванні для ЛГМ-процесу легковагих друкованих моделей, що за об'ємною вагою та газотвірністю приближаються до типових моделей з пінополістиролу, методи конструювання пористих вентильованих моделей та оптимізації процесу газифікації друкованих матеріалів запропоновано реалізувати за допомогою нових алгоритмів проектування легковагих конструкцій, які інтегровані у діюче програмне забезпечення для тривимірного моделювання, зокрема у програму Rhinoceros. В роботі досліджено і випробувано недавно створений компанією Spherene Inc. алгоритм проектування 3D-друкованих конструкцій стосовно друкування ливарних моделей низької об'ємної ваги, призначених для ЛГМ-процесу. Цей алгоритм є прикладом новаторського впровадження в діючу програму тривимірного моделювання досягнень прикладної математики в галузі теорії тривимірних періодичних мінімальних поверхонь. Виконані нами перші приклади цифрового моделювання макропористих ливарних моделей для їх друку підтвердили доступність використання алгоритму від компанії Spherene Inc. і гармонійного включення пор чи порожнин сфероподібної конфігурації (які компанія називає «spherenes») в їх конструкцію як з можливістю підтримання їх достатньої міцності при мінімальній масі моделей, так і для друкування відкритих (трансляційних) пор заданої орієнтації для суцільної вентиляції і відкачування газів вакуумом ливарної форми.

Ключові слова: 3D-технології, 3D-друк, програмне забезпечення, ливарна модель, газифікація моделі, spherenes, ЛГМ.

Abstract. The introduction of 3D printing into foundry production makes it possible to produce metal castings, often with complex geometry, from digital drawings of foundry patterns, which would be difficult or impossible to produce by other methods. 3D printing is especially beneficial for metal casting by gasifying patterns (Lost Foam Casting, LFC process), which uses disposable foam polymer patterns that evaporate in a sand mold from the heat of the metal poured into the mold. In the manufacture and application of lightweight printed models for the LFC process, which in terms of volume weight and gas permeability are close to typical models made of polystyrene foam, it is proposed to implement the methods of constructing porous ventilated models and optimizing the process of gasification of printed materials with the help of new algorithms for the design of lightweight structures. These algorithms are integrated into existing 3D modeling software, including Rhinoceros. In the work, the recently created Spherene Inc. company was researched and tested. an algorithm for designing 3D-printed structures in relation to printing low-volume foundry patterns intended for the LFC process. This algorithm is an example of innovative introduction into the current program of 3D modeling of the achievements of applied mathematics in the field of the theory of three-dimensional periodic minimal surfaces. Our first examples of digital modeling of macro-porous foundry patterns for their printing confirmed the availability of using the algorithm from Spherene Inc. and the harmonious inclusion of pores or cavities of a sphere-derived configuration (which the company calls "spherenes") in their design, both with the possibility of maintaining their sufficient strength with a minimum mass of patterns, and for printing open (translational) pores of a given orientation for continuous ventilation and pumping out gases by vacuum of the foundry molds.

Keywords: 3D technologies, 3D printing, software, foundry pattern, pattern gasification, spherenes, Lost Foam Casting.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2024-59-1-119-126>.

Вступ

Цифровізація та автоматизація сьогодні стали вже не просто основою конкурентної переваги при виробництві товарів (робіт, послуг), у багатьох сферах вони сприймаються як необхідна умова організації виробничих процесів [1]. Зокрема, впровадження в ливарне виробництво 3D-друку (адитивного виробництва), як однієї з галузей цифровізації, дозволяє з цифрових креслень ливарних моделей виготовляти металеві виливки нерідко зі складною геометрією, які було б складно або неможливо виготовити іншими методами. Особливо 3D-друк вигідний для лиття металу за моделями, що газифікуються (ЛГМ-процес, Lost Foam Casting), в якому застосовують разові піно-полімерні (з пінополістиролу, ППС) моделі, які випаровуються в піщаній формі від тепла металу, що заливається в цю форму [2].

Автоматичний друк таких моделей покращить ефективність та якість особливо дрібносерійного, ремонтного та індивідуалізованого виробництва, підтримає конкурентоспроможність підприємств в сучасному ринковому середовищі. Взагалі, 3D-друк, як важливий елемент цифровізації виробництва, що дозволяє без паперових креслень з цифрової моделі за комп'ютерними програмами автоматично виготовляти полімерні моделі, відповідає концепції цифро-фізичного перетворення (з цифрового файлу – у матеріальну конструкцію), що названо терміном: digital-to-physical conversion [3].

Актуальність

Важливою перевагою 3D-технологій при ЛГМ являється можливість змінювати як конфігурацію ливарної металопродукції, так і конструкцію ливарних моделей шляхом внесення змін в цифрове креслення на етапі модельного виробництва без наступного переформатування решти складових діючого ливарного процесу. Проте, розкриття потенціалу впровадження 3D-друку на даному етапі знаходиться лише на початковому рівні. Виготовлення легковагих друкованих моделей, що за об'ємною вагою та газотвірністю приближаються до типових моделей з ППС поки є непростою задачею [2]. Тому розробка нових методів конструювання пористих моделей, придатних для друку, з удосконаленням процесу газифікації друкованих матеріалів та створенням нових алгоритмів проєктування легковагих конструкцій в складі діючого програмного забезпечення для тривимірного моделювання є актуальною темою досліджень. Зауважимо, що ЛГМ-процес не припиняє свого поширення в ливарництві, досягаючи в світовому вимірі, за оцінками експертів, до 4 % всього об'єму литва, що складає близько 4 млн тонн.

Мета

Мета статті полягає в дослідженні і опробуванні недавно створеного компанією Spherene Inc. (Швейцарія, <https://spherene.ch>) алгоритму проєктування 3D-друкованих виробів для ливарних моделей низької об'ємної ваги, придатних для ЛГМ-процесу. Цей алгоритм є прикладом новаторського впровадження досягнень прикладної математики в діючу програму тривимірного моделювання.

Критика способів 3D-друку для виробництва металопродукції і постановка задачі

Відомі способи 3D-друку тривимірних виробів із металу та тугоплавких матеріалів мають ті недоліки, що включають застосування високої вартості енергоємне обладнання. Високотемпературні плавлення чи спікання металовиробів у цих способах потребують значних витрат енергії та, як правило, захисної атмосфери для камери друку, а діючі стандарти контролю якості металопродукції (щодо відповідності марки металу) не розповсюджуються на друковані матеріали. Все це приблизно на порядок збільшує собівартість друку металовиробів порівняно з відпрацьованими ливарними способами [2].

Значно простішим напрямом впровадження 3D-технологій в ливарне виробництво є друкування для ЛГМ-процесу полімерних ливарних моделей, як разової оснастки. Такі друковані ливарні моделі призначені для розміщення (формування) в піску ливарної форми і газифікації їх при заливанні такої форми металом. Оскільки вилівок утворюється після випарування моделі, то контроль якості затверділого вилівка та відповідність марки його металу не відрізняється від традиційно застосовуваних і унормованих діючими стандартами операцій в ливарних цехах. Однак, бурхливий розвиток 3D-друку ще не настільки поширився в ливарні процеси, що може конкурувати з традиційними технологіями, наприклад щодо друку моделей, аналогічних за низькою густиною матеріалу ППС. Тому нові удосконалення 3D-друку і його програмного забезпечення є поточною проблемою в плані взаємної адаптації з діючим виробництвом, зокрема щодо оптимізації конструкторських рішень на основі математичних методів. Звідси, задача покращення якості тривимірних виробів на етапі проєктування, зменшення витрат та часу, необхідних для їх створення, і забезпечення високого рівня їх конкурентоспроможності полягала в дослідженні геометричних та топологічних принципів і алгоритмів для пошуку оптимальної конфігурації матеріалу в межах конструкції ливарних моделей з урахуванням функціональних вимог та обмежень.

Приклади розв'язання задачі на основі застосування нового алгоритму програмування

В процесі аналізу новітньої інформації нас зацікавив алгоритм, розроблений компанією Spherene Inc., який створює адаптивні поверхні (для) мінімальної щільності (Adaptive Density Minimal Surfaces, ADMS) як самопідтримуючу стратегію заповнення, яку можна використовувати для зменшення маси та керування властивостями матеріалу в 3D-друкованих деталях [4].

Тривимірні періодичні мінімальні поверхні (Triply Periodic Minimal Surfaces, TPMS) [5, 6], такі як гіроїд [6], стали звичайними елементами дизайну для 3D-друкованих деталей. Теорія мінімальних поверхонь (МП) - одна з класичних і в той же час галузей математики, що розвиваються (на стику геометрії, топології та варіаційного обчислення). Вона вивчає математичні властивості поверхонь, які мінімізують певні енергетичні функціонали. Основна ідея полягає в тому, що МП має найменшу можливу енергію серед усіх поверхонь, які обмежені заданим контуром або границею. Наочною реалізацією МП служить мильна плівка, вона затягує контури різної конфігурації та набуває форми, що відповідає мінімуму потенційної енергії (енергії поверхневого натягу), яка прямо пропорційна її площі.

Окремий клас МП утворюють періодичні поверхні TPMS, які можуть бути отримані нескінченним повторенням деякої елементарної комірки, а застосування їх для 3D-моделювання підвищує технологічність наступного виробництва модельованих конструкцій шляхом збирання останніх (в заданих просторових напрямках), зокрема з повторюваних серійно виготовлених (надрукованих) елементів моделей. Для фахівців з 3D-моделювання цікавим є застосування теорії TPMS, оскільки вона дозволяє створювати складні геометричні форми, які можуть бути використані для створення унікальних та ефективних конструкцій, зокрема в ливарному виробництві. Також ця теорія знаходить широкі застосування у різних

галузях, включаючи матеріалознавство, архітектуру та біологію.

Робота [5] містить важливі відомості про цю теорію і може бути корисною для розуміння її застосувань у 3D-моделюванні. Крім того, таке моделювання дозволить створювати поверхні "мінімальні" з точки зору таких складних функціоналів, як комбінація енергії поверхневого натягу, гравітаційної енергії, енергії деформації тощо, а також довільних поверхневих інтегралів, що задаються користувачем. Це дає можливість не лише отримувати на комп'ютері креслення моделі з МП, але і МП у поєднанні з заданими службовими характеристиками модельованих конструкцій, що потім будуть отримані 3D-друком. Аналітичність МП, кожна точка яких визначається у просторі аналітичною функцією, спрощує 3D-моделювання, технологічність виготовлення матеріальних виробів, а також контроль їхньої якості і подальшої обробки за допомогою сучасного устаткування з програмним забезпеченням.

Компанія Spherene Inc., зокрема наслідуючи коралоподібні природні структури, розробила дещо нову (порівняно з TPMS) геометрію метаматеріалів, засновану на іншому класі геометричних форм, що за рахунок мінімальних поверхонь (МП) мінімізують об'ємну масу матеріалу: сфери, або, точніше, інверсні сфери, які компанія називає «spherenes» [4]. 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.

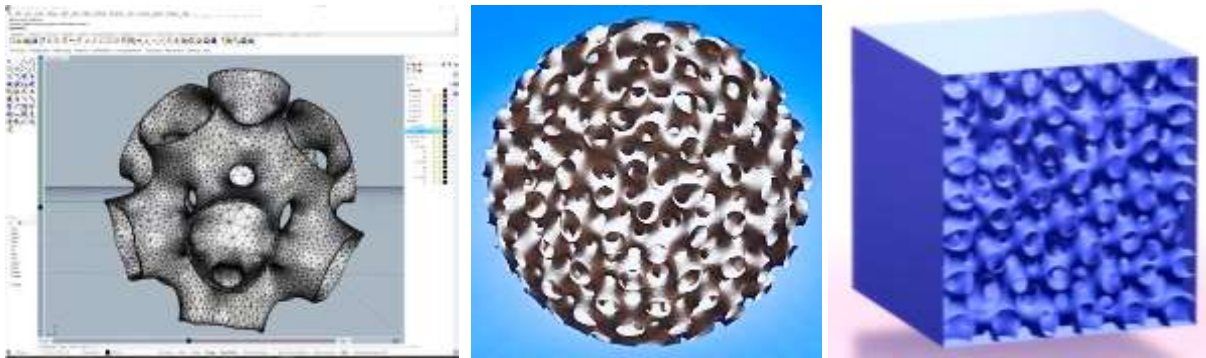


Рисунок 1 - Приклади структур типу spherenes, в тому числі в якості наповнювача в конструкціях з зовнішньою гладкою поверхнею у вигляді куба (моделі створено за методикою з сайту <https://spherene.ch>)

Компанія Spherene Inc. алгоритм заповнення друківаних конструкцій за допомогою інверсних сфер зробила доступним через програмний інтерфейс застосування (API – Application Programming Interface) Rhino. Rhinoceros (Rhino), згідно <https://uk.wikipedia.org>, - NURBS-орієнтована програма для тривимірного моделювання, розроблена Робертом МакНілом (Robert McNeel & Associates). Це програмне забезпечення здебільшого використовується для промислового дизайну, архітектури, ювелірного дизайну, дизайну транспортних засобів, САПР, швидкого прототипування, зворотної розробки, а також у галузях мультимедіа і графічного дизайну.

На рис. 1 перше фото ліворуч та інші фото нижче (з відображенням комп'ютерного меню) відтворено у вигляді скріншота з екрану, де автори статті використовували програму Rhinoceros 8 для моделювання.

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 тривимірних фізичних об'єктів (рис. 2). Сфери складають наче один безперервний оболонковий лабіринт і є ідеальною формою для втримання і розподілення напружень всередині порожнього об'єму.

Засновник компанії, Крістіан Вальдвогель, колишній архітектор і художник, експериментуючи з паперовою моделлю семикутників, прийшов до висновку, що мінімальні поверхні можна розглядати як перевернуті сфери, що заповнюють простір [4]. Створений Spherene Inc. (замість окремої програми) хмарний API інтегрується як з програмним забезпеченням САПР Rhino, так може застосовуватися і в інших середовищах САПР. Компанія є стартапом з 2018 р. і пропонує послуги з інтеграції сферичних структур у CAD-моделі клієнтів, а також планує надати комерційне ліцензування метаматеріалу spherenes.

Переваги матеріалу spherenes заявлено такі [4].

- Зменшення ваги. Заміняє інший матеріал на заданій об'ємній ваги заповнення, зберігаючи міцність.
- Налаштовуваність. 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 або контролю еластичності.



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

- Відповідність поверхні. Сферени за своєю природою повторюють форму обмежувальної геометрії.
- Самоокупний. У більшості процесів 3D-друку об'єкти, виготовлені зі сферичного метаматеріалу, можна друкувати без опорних структур.
- Економія матеріалів. Конструкції, наповнені такими структурами, використовують менше матеріалу для друку та можуть друкуватися швидше.

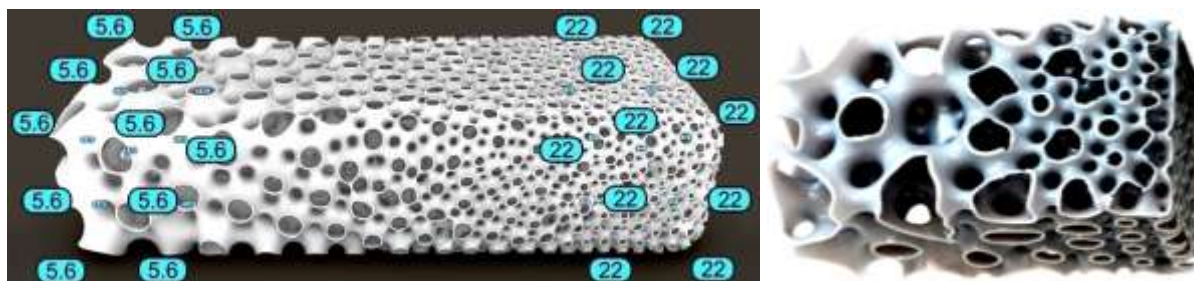


Рисунок 3 - Структура з градієнтом щільності і її друківаний приклад (з сайту <https://spherene.ch>)

Використання Spherene API потребує, щоб користувач спочатку визначив модель у САПР, що слугує обчислювальною оболонкою, у якій генеруватимуться оболонки сферичної геометрії. Залежно від вибору дизайнера, модель може бути заповнена сферою постійної щільності та фіксованої товщини, або вона 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.

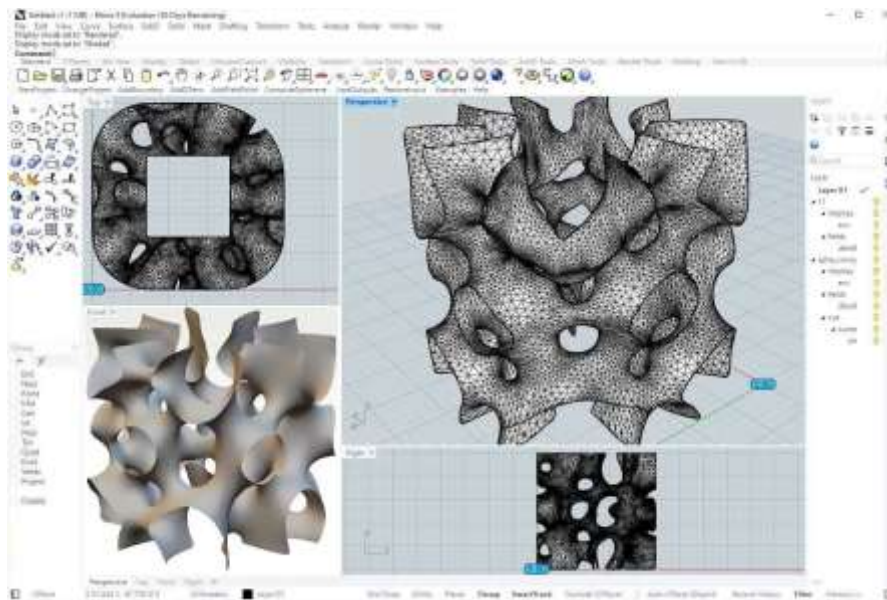
Незалежно від вхідних даних або геометричної складності оболонки, алгоритм Spherene Inc. генеруватиме ізотропну мінімальну поверхню, що складається з двох переплетених просторів [4]. Якщо цього не буде спеціально вказано, алгоритм ніколи не створить повністю закриту форму для 3D-друку. API Spherene автоматично 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 починають рух до бажаного результату, вираженого 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 метаматеріалу spherene виконає моделювання матеріалу автоматично.

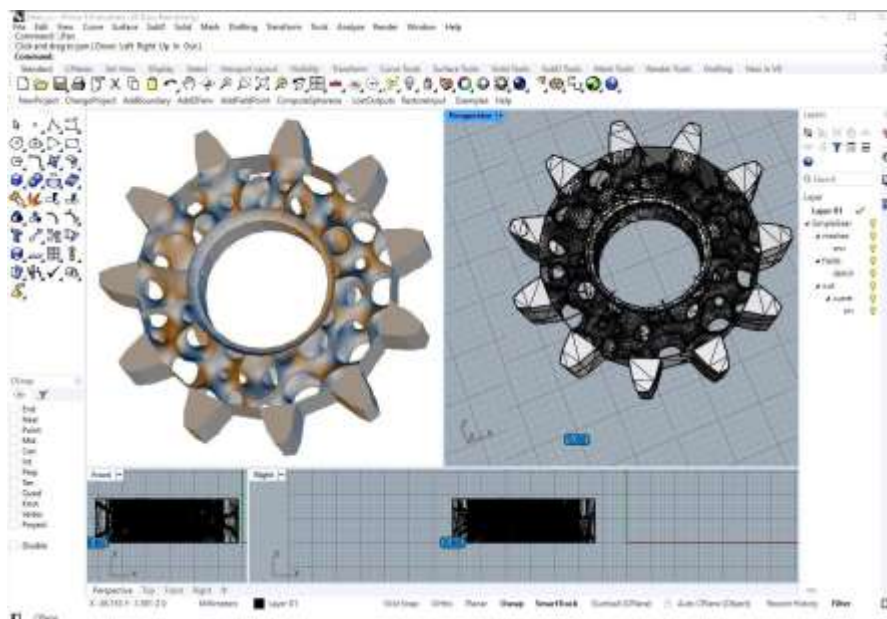
У багатьох випадках градієнти потрібні для створення жорсткіших окремих областей деталі. При цьому постійні практичні застосування дозволяють точніше прогнозувати, як можуть працювати конкретні 3D-друковані об'єкти, не обов'язково покладаючись на моделювання та тестування. Так, можна надрукувати сталеву деталь зі зниженою щільністю до такої міри, що матеріал буде нагадувати алюміній, як за вагою, так і за міцністю. Економія часу та матеріалів на розробку істотно впливає на зміну економічності деталі [4].

Як методика заповнення (порівняно з іншими геометричними 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 технологій 3D-друку. За словами компанії, відповідність поверхні та контрольований стан оболонки також забезпечують бездоганну інтеграцію збірки з цими структурами [4]. Інструмент дизайну Spherene Inc. наразі знаходиться в загальнодоступній бета-версії для тестування безкоштовно, а також компанія надає індивідуальні рішення для замовників у таких галузях, як аерокосмічна промисловість, високоефективні технології, інструменти, спортивне взуття та медицина [4].

На рис. 4, а-г показано наші моделювання у програмі Rhinoceros 8 за алгоритмом ADMS.



а



б

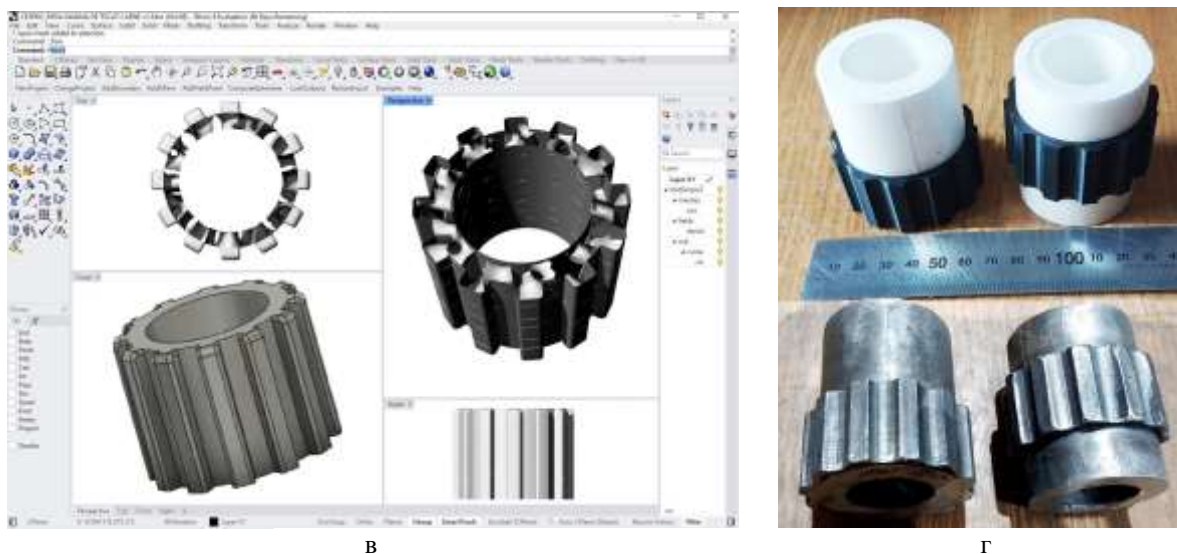


Рисунок 4 - Моделювання у програмі Rhinoceros 8 за алгоритмом ADMS: а – заповнення оболонками простору «куб» з каналом під трубу профільну квадратну; б – модель шестерні; в – модель «втулка приводна»; г – ливарні моделі і вилівки «втулка приводна» (3D-друк суцільної моделі зі вставкою з ППС)

Для порівняння з модельованими за алгоритмом ADMS на рис. 4, в показано два варіанти подібної форми ливарних моделей на рис. 4, г (верхній ряд) і вилитих (з чавуну СЧ200 ДСТУ EN 1561:2010) по ним деталей «втулка приводна» (нижній ряд), раніше виготовлених згідно із роботою [7]. Друковані методом FDM суцільні формуючі частини моделі чорного кольору (рис. 4, г) для полегшення маси всієї моделі були насаджені на патрубкі з ППС (білого кольору). Інакше вилити способом ЛГМ за друкованими моделями без створення в них пористої стінки з ППС в моделях не вдавалось, попередні спроби давали лише браковані металовироби.

На рис. 5 показано наші перші пробні друкування з пластику PLA на принтері «Vambu Lab A1 mini» елементів, змодельованих за алгоритмом ADMS. Ці елементи дещо схожі на спрощений варіант моделей, зображених на рис. 4, а. Оскільки на цьому принтері досягається товщина друкованого шару 0,1-0,4 мм (100-400 мкм), то ми прагнемо подальшим відпрацюванням досягти друку більш складних і ажурних конструкцій включно з ливарними моделями спрямованої пористості для ЛГМ.

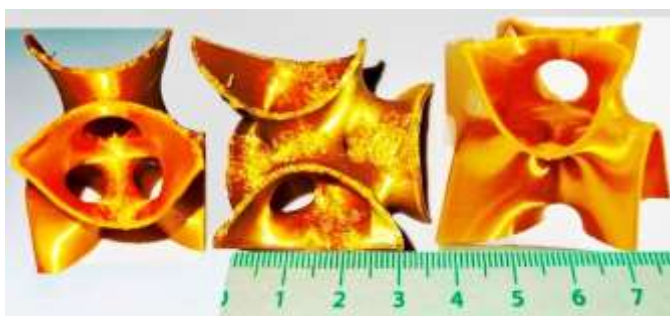


Рисунок 5 – Друковані елементи за алгоритмом ADMS на 3D-принтері методом FDM

Виконані нами перші приклади цифрового моделювання для друку і спроби друкування пористих (порожнистих) полімерних ливарних моделей показали придатність використання алгоритму від Sphere Inc. з гармонійним включення пор до їх конструкції для зменшення маси моделей. Наступними кроками будуть вибір оптимального способу їх друкування і досягнення майстерності в цьому, а також дослідження декількох можливих переваг чи додаткових функцій з огляду мінімізації маси (кількості матеріалу) в залежності від достатніх механічних властивостей друкованої ливарної моделі та регулювання аеродинамічних характеристик утворених вентканалів в пористому середовищі моделі, зниження коефіцієнта опору фільтрації в них газів в залежності від рівня впливу вакуумування з боку піщаної ливарної форми і ступеня його силової дії на стінки піщаної форми (для забезпечення їх непорушності) та на метал, що газифікує модель, тощо.

Таким чином, після першого етапу впровадження 3D-друку в ЛГМ-процес лиття металу за комбінованими моделями з підкладками з ППС, які покриті друкованими поверхневими оболонками [2, 7] чи

змонтовані з окремими друківаними на 3D-принтері деталями (рис. 4, в), створюються передумови переходу до наступного етапу: 3D-моделювання і друкування оптимально спроектованих цільних пористих ливарних моделей. Такий крок значно розширює можливості 3D-друку, практично повністю автоматизуючи виробництво полімерних газопроникних ливарних моделей, яке можливо виконувати цілодобово, наслідуючи такий процес на вже існуючих фермах 3D-друку [9].

Підбиваючи підсумки, нагадаємо з роботи [2] про концепцію здійснення ЛГМ-процесу за пористими друківаними моделями, відображену в способі лиття [8] і для реалізації якої виконано вище описані приклади моделювання. При газифікації металом у ливарній формі полімерної моделі з пористою серцевиною стінок цю пористість використовують як соти-вентканалі, крізь які виводять газу по ходу поступової газифікації моделі металом, що заповнює вакуумовану піщану форму і заміщує модель. Верхню частину моделей друкують так, щоб до моделі доєднати полімерні трубки-надставки для випорів чи надливів, які сполучають з вентканалами моделі, накривають газопроникним матеріалом, що не пропускає пісок, і крізь ці надставки виводять газу від моделі у пори піску форми з відсмоктуванням їх завдяки вакууму, який підтримують у цій формі.

Якщо традиційна ливарна модель з ППС газонепроникна, має закриті пори і метал випаровує хаотично орієнтовані стінки-оболонки цих пор, то 3D-друком отримують відкриті (трансляційні) пори заданої орієнтації (раніше внесені в конструкцію моделі на моніторі комп'ютера) для суцільної вентиляції і відкачування вакуумом газів (від випаровування - газифікації металом цієї моделі) разом з частковим засмоктуванням металу, що полегшує заповнення ним формотворної порожнини, загалом підвищуючи якість лиття. Описаний механізм застосування пористих друківаних моделей [8] дозволяє лити метал навіть за моделями дещо більшої газотвірності, ніж з традиційного ППС. Цьому сприяє розкриття потенціалу друку, що надає ливарній моделі як традиційну функцію відтворення геометрії виливка, так і функцію спрямованого і примусового видалення продуктів її газифікації крізь піщане середовище вакуумованої ливарної форми.

Висновки

Адитивні технології виробництва відкривають можливості для змін у конструкціях ливарної продукції та її ливарних моделей шляхом внесення змін у цифрову модель продукції без необхідності зміни ливарного обладнання. Це дозволяє швидко та ефективно адаптувати (варіювати) конструкції для виробництва за новими вимогами чи замовленнями без значних витрат часу і коштів на виготовлення нового оснащення та інших засобів виробництва, сприяє швидкому та ефективному росту виробництва та модифікації металопродукції. При виготовленні і застосуванні для ЛГМ-процесу легковагих друківаних моделей, що за об'ємною вагою та газотвірністю наближаються до типових моделей з ППС, методи конструювання пористих вентиляційних моделей, оптимізації процесу газифікації друківаних матеріалів запропоновано реалізувати за допомогою нових алгоритмів проектування легковагих конструкцій, які інтегровані у діюче програмне забезпечення для тривимірного моделювання, зокрема у програму Rhinoceros. В статті досліджено і випробувано недавно створений компанією Spherene Inc. алгоритм проектування 3D-друківаних конструкцій стосовно друкування ливарних моделей низької об'ємної ваги, придатних для ЛГМ-процесу. Цей алгоритм є прикладом новаторського впровадження в діючу програму тривимірного моделювання досягнень прикладної математики в галузі теорії тривимірних періодичних мінімальних поверхонь. Виконані нами перші приклади цифрового моделювання макропористих ливарних моделей для їх друку і пробні друкування з полімеру підтвердили доступність використання алгоритму від Spherene Inc. і гармонійного включення пор чи порожнин сфероподібної конфігурації в їх конструкцію як з можливістю збереження достатньої міцності моделей при зменшенні їх маси, так і друкування відкритих (трансляційних чи спрямованих) пор заданої орієнтації для суцільної вентиляції і відкачування газів вакуумом ливарної форми разом з частковим засмоктуванням металу в робочу порожнину форми.

Науково-технологічне дослідження виконано згідно договору 226 (166/24) від 22.02.2024 про наукове співробітництво між Фізико-технологічним інститутом металів та сплавів НАН України та Вінницьким національним технічним університетом.

Список літератури

- [1] N. D. Rasmussen, "A Digital Revolution is Transforming Foundries Worldwide", *Foundry Management & Technology*. Jan./Feb., pp. 27-28. 2024.
- [2] В. С. Дорошенко, О. Б. Янченко, "Застосування комп'ютерних систем для проектування та 3D-друку ливарної моделі з вентиляційними каналами в її стінках", *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 3, с. 53-58. 2023.
- [3] Industry 4.0: How to navigate digitization of the manufacturing sector. McKinsey Digital. [Online]. Available: https://www.mckinsey.de/files/mck_industry_40_report.pdf. Accessed on: 2015.

- [4] S. Hendrixson, "Metamaterial With Geometry Derived From Spheres", *Additive Manufacturing*. May, p. 40. 2024.
- [5] Meeks. William H. The Theory of Triply Periodic Minimal Surfaces. *Indiana University Mathematics Journal*. 39, no. 3, pp. 877-936. 1990.
- [6] Triply-periodic minimal surfaces. [Online]. Available: <https://schoengeometry.com/e-tpms.html>.
- [7] П. Б. Калюжний, В. С. Дорошенко, О. В. Нейма, "Лиття за комбінованими полімерними моделями, що газифікуються", *Процеси лиття*, № 2, с. 49-55. 2023.
- [8] І. А. Шалевська, О. В. Нейма, С. О. Кротюк, В. С. Дорошенко, "Спосіб лиття металу за 3D-друкованими моделями, що газифікуються у вакуумованих формах з сипкого піску", *заявка України u202305216. МПК8 B22 C7/02, B22C 9/04*. 3.11.2023.
- [9] В. С. Дорошенко, П. Б. Калюжний, С. В. Коломійцев, "Приклади 3D-технологій виробництва металовиробів і полімерних моделей", *Процеси лиття*, № 4, с. 48- 54. 2021.

Стаття надійшла до редакції: 27.04.2024

References

- [1] N. D. Rasmussen, "A Digital Revolution is Transforming Foundries Worldwide", *Foundry Management & Technology*. Jan./Feb., pp. 27-28. 2024.
- [2] V. S. Doroshenko, O. B. Yanchenko, "Application of computer systems for designing and 3D printing of a foundry pattern with ventilation channels in its walls", *Information technologies and computer engineering*, No. 3, pp. 53-58. 2023.
- [3] Industry 4.0: How to navigate digitization of the manufacturing sector. McKinsey Digital. [Online]. Available: https://www.mckinsey.de/files/mck_industry_40_report.pdf. Accessed on: 2015.
- [4] S. Hendrixson, "Metamaterial With Geometry Derived From Spheres", *Additive Manufacturing*. May, p. 40. 2024.
- [5] Meeks. William H. The Theory of Triply Periodic Minimal Surfaces. *Indiana University Mathematics Journal*. 39, no. 3, pp. 877-936. 1990.
- [6] Triply-periodic minimal surfaces. [Online]. Available: <https://schoengeometry.com/e-tpms.html>.
- [7] P. B. Kalyuzhny, V. S. Doroshenko, O. V. Neyma, "Casting according to combined polymer patterns that are gasified", *Casting Processes*, No. 2, pp. 49-55. 2023.
- [8] Pat. Appl. u202305216 UA, IPC B22C7/02, B22C9/04, Method of metal casting according to 3D-printed patterns, which are gasified in vacuum molds from loose sand, P. B. Kalyuzhny, I. A. Shalevska, O. V. Neyma, S. O. Krotiyuk, V. S. Doroshenko, Publ. 3.11.2023.
- [9] V. S. Doroshenko, P. B. Kalyuzhny, S. V. Kolomiitsev, "Examples of 3D technologies for the production of hardware and polymer patterns", *Casting Processes*, No. 4, с. 48- 54. 2021.

Відомості про авторів

Бродовий Олег Володимирович – студент ліцею.

Дорошенко Володимир Степанович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу фізико-хімії ливарних процесів.

Янченко Олександр Борисович – кандидат технічних наук, доцент кафедри галузевого машинобудування.

O. V. Brodovy¹, V. S. Doroshenko², O. B. Yanchenko³

3D DESIGN OF POROUS FOUNDRY PATTERNS IN THE RHINOCEROS 8 PROGRAM

¹Mikhail International Lyceum, Kyiv

²Physical-technological Institute of Metals and Alloys, of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

³Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia