

Дорошенко В.С.

Цифрове моделювання метаматеріалів для 3D-друку ливарних моделей в контексті переходу до виробництва на вимогу

Doroshenko V.S.

Digital modeling of metamaterials for 3D printing of foundry patterns in the context of transition to on-demand manufacturing

Анотація. У сучасних умовах глобальної нестабільності, ринкових коливань і варіативності потреб споживачів виробництво «на вимогу» стає перспективною стратегією, підтримуваною інноваціями у сфері адитивного виробництва (3D-друку). **Мета роботи** — дослідження використання програми *sphereneRHINO* (Spherene Inc., Швейцарія) для проектування і друкування пористих структур ливарних моделей замість традиційних з пінополістиролу. **Методика:** було проаналізовано процес цифрового проектування полімерних моделей, виконано проектування у зазначеній програмі та надруковано зразки моделей. **Результати.** Ілюстративно описано алгоритм і можливості програми *sphereneRHINO*, отримано зразки комірчастого матеріалу моделей, розроблено спосіб їх друку з відкритими порами та транзитною пористістю. Газопроникність моделі використано для вакуумування піщаної форми та структури моделі, що дозволило її газифікувати розплавом металу з одночасним відкачуванням газів і створити ефект лиття вакуумним всмоктуванням. **Наукова новизна.** Піно-матеріал, який не призначався для ливарних моделей, застосовано для проектування й друку пористих моделей із контролем щільності, товщини стінок і геометрії друкованих пор. **Практична значущість:** значне скорочення термінів проектування й виготовлення полімерних моделей завдяки застосуванню 3D-друку сприяє адаптивності підприємств до змін ринку, реалізації моделі виробництва «на вимогу» та цифровізації процесу лиття з мінімізацією витрат часу й ресурсів.

Ключові слова: 3D-друк, адитивне виробництво, виробництво на вимогу, ливарні моделі, метаматеріал, лиття за моделями, що газифікуються.

Abstract. In today's conditions of global instability, market fluctuations and variability of consumer needs, manufacturing "on demand" is becoming a promising strategy, supported by innovations in the field of additive manufacturing (3D printing). **The purpose** of the work is to study the use of the *sphereneRHINO* program (Spherene Inc., Switzerland) for designing and printing porous structures of foundry models instead of traditional ones made of expanded polystyrene. **Methodology:** the process of digital design of polymer patterns was analyzed, design was performed in the specified program and pattern samples were printed. **Findings.** The algorithm and capabilities of the *sphereneRHINO* program are exemplarily described, samples of cellular material of patterns were obtained, a method of printing them with open pores and transit porosity was developed. The gas permeability of the pattern was used to vacuum the sand mold and the pattern structure, which allowed it to be gasified with molten metal with simultaneous pumping out of gases and to create the effect of casting by vacuum suction. **Originality.** The foam material, which was not intended for casting patterns, was used to design and print porous patterns with control of density, wall thickness and geometry of printed pores. **Practical value:** a significant reduction in the design and manufacturing time of polymer patterns through the use of 3D printing contributes to the adaptability of enterprises to market changes, the implementation of the "on-demand" production model and the digitalization of the casting process with the minimization of time and resource costs.

Key words: 3D printing, additive manufacturing, on-demand manufacturing, casting patterns, metamaterial, Lost Foam Casting.

Вступ. При нинішніх ринкових коливаннях, ризиках глобальної нестабільності та зростаючої варіативності потреб споживачів виробництво на вимогу (on-demand manufacturing) стає перспективною стратегією, що активно підтримується інноваціями у сфері адитивного виробництва (AB), також відомого як 3D-друк [1, 2]. Низка переваг моделі «на вимогу» включає оптимізацію ланцюгів постачання, зниження ризиків завдяки локалізації виробництва ближче до споживача. З друкуванням виробів з цифрових файлів цифрові каталоги запасних частин потребують значно менше інвестицій, ніж фізичне утримання складів, що економить ресурси. Виготовлення продукції лише у потрібний момент з мінімізацією відходів і надлишкових запасів зменшує витрати на логістику. Скорочення транспортних

витрат і кількості непроданих товарів сприяє зниженню вуглецевого сліду.

Згідно зі звітом McKinsey (2023), до 2030 р. впровадження виробництва на вимогу здатне збільшити глобальний ВВП на 2,3 трильйона доларів, а 73 % компаній прогнозують зростання прибутковості завдяки цій стратегії [1], ключовим інструментом чого стає AB. AB, як рушійна сила змін, все частіше розглядається в плані модернізації традиційних ливарних процесів з орієнтацією їх на цифрове виробництво. Проте цей процес досить тривалий і наукоємний. Якщо перспектива 3D-друку як виробничого процесу, альтернативного литтю металів, не відбулася, то на певних ділянках ливарного цеху, зокрема з виготовлення ливарних полімерних моделей, 3D-друк вже сьогодні може принести суттєві



вигоди. Він забезпечує доступ до сучасних матеріалів, підвищує надійність технологій і надає змогу створювати вироби з мінімальною масою завдяки оптимізації дизайну шляхом цифрового моделювання без значних витрат на переобладнання. 3D-друк дозволяє підприємствам виготовляти складні деталі з мінімальним втручанням людини, може автоматизувати до 95 % створення друкованої продукції, що значно скорочує трудовитрати, порівняно з традиційними технологіями. Виникає можливість швидкої зміни конфігурації виробів завдяки гнучкому управлінню цифровими файлами, застосування складної органічної геометрії, якої традиційні методи виробництва нерідко не можуть забезпечити. Процес друку не залежить від обсягу виробництва, будь то одна деталь чи серія, а екологічність досягається за рахунок зниження відходів. Заміна одного виробу на інший вимагає лише завантаження нового цифрового файлу, що мінімізує простой обладнання. Однак для деталей, які потребують термічної обробки або додаткових тестувань, важливим залишається проектування з урахуванням мінімізації подальших операцій.

Аналіз літератури. Загалом, адитивні технології у поєднанні з концепцією виробництва на вимогу стають невід'ємною частиною цифрової трансформації промисловості, що забезпечує не лише конкурентні переваги, але й відкриває нові можливості для створення гнучких, економічно ефективних виробничих систем, в яких 3D-друк стає неодмінною складовою [3]. Зокрема, ливарні підприємства дедалі більше осягають можливості цифрової трансформації для підвищення своєї прибутковості разом з адаптацією до вимог декарбонізації виробництва [4], при цьому 3D-друк стає потужним інструментом при створенні нової продукції з інноваційних матеріалів та покращеними властивостями, а інтенсивності його розвитку немає аналогів.

Особливо 3D-друк перспективний для лиття металу за моделями, що газифікуються (ЛГМ-процес, Lost Foam Casting), в якому застосовують разові пористі полімерні (передусім, з пінополістиролу, ППС) ливарні моделі, які випаровуються в піщаній формі під впливом розплаву металу, що заливається в цю форму [5]. Собівартість моделей для традиційного ЛГМ сягає до третини собівартості виливків, що включає значні витрати на модельну оснастку. Автоматичний 3D-друк таких моделей здатен підвищити ефективність та якість особливо дрібносерійного, ремонтного та персоналізованого (кастомізованого) виливання металовиробів, стабілізувати конкурентоспроможність виробництва в сучасному ринковому просторі. З цифрової моделі (без паперових креслень) 3D-друк полімерних моделей реалізує концепцію «цифрофізичного перетворення» (з цифрового файлу – у матеріальну конструкцію), згідно терміну «digital-to-physical conversion» [6]. Швидка зміна конфігурації ливарної металопродукції слідом за зміною конструкції відповідних разових друкованих ливарних моделей після внесення змін в цифрові креслення є характерною перевагою 3D-

технологій для ЛГМ, яка проявляється на етапі проектування та друку цих моделей без переформатування решти ливарного обладнання і оснастки в діючих цехах.

Стосовно обґрунтування постановки задачі дослідження критично розглянемо, чим метод 3D-друку для ЛГМ вигідний серед інших методів АВ металопродукції. Відомі способи 3D-друку конструкцій з металу та тугоплавких матеріалів мають ті недоліки, що в них застосовують енергоємне обладнання високої капіталемності, а процеси плавлення металу чи спікання металовиробів при високих температурах потребують значних енерговитрат та нерідко захисної атмосфери для герметичних камер друку. А також діючі стандарти контролю якості металопродукції (зокрема, щодо відповідності традиційним маркам металу) не пристосовані до друкованих матеріалів. Зазначені та інші обставини ускладнюють конкуренцію 3D-друку з традиційним виробництвом та приблизно на порядок збільшують собівартість друкованих металовиробів порівняно з типовими ливарними способами.

Значно доступнішим напрямом впровадження 3D-друку в ливарне виробництво є друкування для ЛГМ-процесу пористих полімерних моделей, як разової ливарної оснастки. Оскільки при ЛГМ виливок утворюється після випарування моделі в піщаній формі, то контроль якості затверділого вилівка та відповідність марки металу виконують за чинними стандартами. Однак, розвиток 3D-друку полімерних конструкцій ще не досяг того ступеня, щоб отримувати друковані матеріали з такою ж низькою щільністю як нині застосовуваний для моделей ППС. Друкування легковагих моделей, що за об'ємною вагою та низькою газотвірністю приближаються до типових моделей з ППС, поки є непростю задачею [5]. Перші спроби газифікації друкованих моделей в процесі ЛГМ часто давали нестабільну якість виливків із-за високої зольності таких моделей і їх високої газотвірності. Розкриття потенціалу впровадження 3D-друку в ЛГМ-процес на даному етапі знаходиться лише на експериментальному рівні. Тому розробка нових методів конструювання пористих легковагих моделей, нові удосконалення їх 3D-друку і його програмного забезпечення є актуальною темою науково-інженерних досліджень в плані адаптації до діючого ЛГМ-процесу, що мотивувало наш пошук пористих матеріалів за умов незначних фінансових витрат та часу для їх цифрового моделювання, друкування та оптимальної газифікації.

Зазначимо, що за Інтернет-інформацією [7] спосіб ЛГМ за друкованими моделями пробує виводити на ринок лише одна компанія Skuld LLC (США) за патентованим нею способом. При цьому, як нею повідомлялось, при ЛГМ друкована модель поєднується з підкладкою з ППС. Загалом, згідно з поточними публікаціями, ЛГМ-процес продовжує поширюватись в ливарництві, за оцінками експертів наближаючись до 3-4 % об'єму литва в світовому вимірі, що складає близько 3-4 млн тонн. Помітне

зростання кількості підприємств із ЛГМ набуло в Китаї, що сприяло досягненню країни світового лідерства за тоннажем ливарної продукції.

У процесі Аналізу інформації привернув увагу алгоритм, розроблений компанією Spherene Inc. (Швейцарія, <https://spherene.ch>), який ґрунтується на створенні так званих «адаптивних поверхонь мінімальної щільності» (Adaptive Density Minimal Surfaces, ADMS) пористого метаматеріалу, як стратегії заповнення простору матеріалом з властивістю самопідтримки його структури в процесі друкування [8, 9]. Метаматеріалами (Metamaterials) називають штучні матеріали з незвичайними фізичними властивостями, що не зустрічаються у природних матеріалах. Цей алгоритм цифрового дизайну метаматеріалу проходить стадію патентування і його авторами ще не був запропонований для ливарного виробництва, але має значні перспективи для вирішення проблеми друку пористих моделей для ЛГМ.

Мета і завдання дослідження полягають в аналізі алгоритму та випробуванні його в процесі цифрового дизайну пористого метаматеріалу для мінімізації маси та керування властивостями 3D-друкованих ливарних моделей. Перші кроки такого дослідження описано в роботі [10]. Цей алгоритм є варіантом реалізації теорії тривимірних мінімальних поверхонь (МП) в діюче програмне забезпечення для 3D-моделювання.

Результати дослідження та їх обговорення. Нині тривимірні періодичні МП (Triply Periodic Minimal Surfaces, TPMS) [9], наприклад гіроїд [11], стали нерідкими елементами дизайну для 3D-друкованих конструкцій. Математичні властивості МП

залишаються предметом активних досліджень завдяки їхньому фундаментальному значенню в геометрії, топології, фізиці та інженерії. В інженерії МП використовуються для оптимізації конструкцій, таких як куполи, мости та архітектурні мембрани тощо, а також мають значний вплив на комп'ютерну графіку, моделювання матеріалів і дизайн, дозволяючи будувати ефективні та естетично привабливі форми з мінімальними ресурсами. Періодичні поверхні TPMS [11, 12] є нескінченним повторенням деякої елементарної комірки. Аналітичність МП, кожна точка яких визначається у просторі аналітичною функцією, спрощує 3D-моделювання, технологічність виготовлення матеріальних виробів, а також контроль їхньої якості за допомогою сучасного устаткування з програмним забезпеченням. Нині такі алгоритми все ширше застосовують у різних галузях, включаючи матеріалознавство, архітектуру та біологію.

Компанія Spherene Inc. на деяких аналогах коралоподібних природних структур опрацювала нову (на противагу TPMS) геометрію метаматеріалу, засновану на іншому класі геометричних форм, що за рахунок МП мінімізують об'ємну масу матеріалу, і для цього використала сфери, або, точніше, інверсні сфери, які компанія назвала сферами («spherenes») [8, 9]. Моделюванням мінімальних енергетичних станів методом МП для матеріалів у фізичних моделях досягають того, що структури - сфери рівномірно розподіляють напругу, чим мінімізують кількість використовуваного матеріалу. Приклади такого моделювання показано на рис. 1.

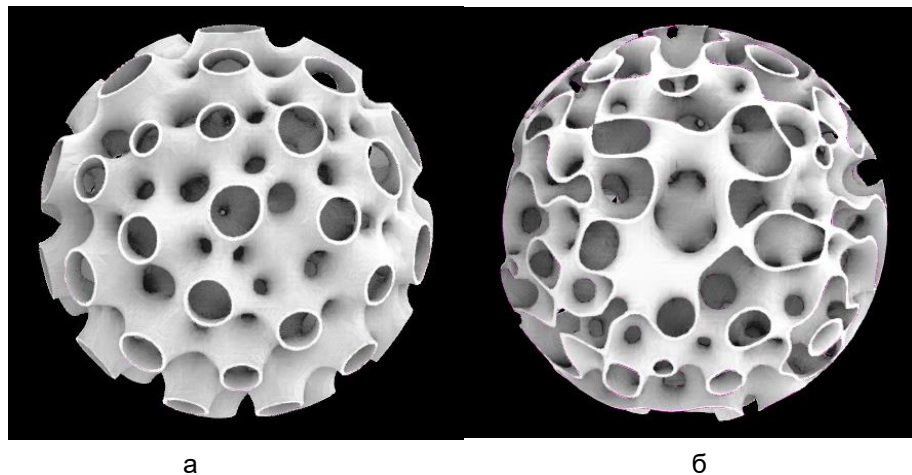


Рисунок 1. Моделі з поверхнями типу «вулкан» (а) і «павутина» (б) [8]

Біонічні структури, якими намагаються імітувати морфологічні особливості тканини коралів, і раніше були об'єктами досліджень та моделювання 3D-друку [10], оскільки корали еволюціонували в конкурентному середовищі з обмеженими ресурсами як оптимізовані і одні з найпродуктивніших у світі екосистем з огляду механічних та інших властивостей.

В Інтернеті компанія Spherene Inc. представила бета-версію програми sphereneRHINO на основі

діючої популярної програми Rhinoceros для 3D-моделювання пористих легковагих структур - сферів [8, 9]. Наші дослідження (в продовження роботи [10]) полягали в застосуванні методики конструювання цих структур для друку ливарних моделей замість традиційних з ППС для ЛГМ. Постало питання, як можна проектувати друковані моделі з такого матеріалу низької маси та достатньої міцності, який би потребував мало витрат енергії на його випаровування при ЛГМ, мав низьку газотвірність і

достатню екологічну безпечність, що притаманна біорозкладним полімерам (біополімерам).

Розглянемо перелік операцій при 3D-моделюванні конструкцій в програмі sphereneRHINO [9]. Спершу дизайнер визначає простір (конверт), в якому згенерує сференову структуру. Задає такі параметри, як щільність, товщина стінки та нахил поверхні. Вибирає геометричну конфігурацію тієї складності, що відповідає потребам дизайну, та контролює, як сфери стикаються з іншими поверхнями, «вирастають» з них або створюють часткові чи замкнуті оболонки. В цій програмі щільність пористого матеріалу служить синонімом його об'ємної ваги, вказується у відсотках від об'єму конструкції в межах зовнішньої оболонки в чисельних значеннях шкали діафрагми фотоапарата, як зручної шкали для запам'ятовування і регулювання.

Програма sphereneRHINO створює сфери (як новий клас МП) на основі геометрії «мінімальної поверхні адаптивної щільності» (ADMS). Матеріал з такою геометрією пор можна регулювати як за

щільністю, так і за товщиною стінок в різних місцях, зберігаючи нульову середню кривизну поверхні (властивість МП), уникати замкнутих порожнин (важливо для друку в рідких чи сипких середовищах способами SLA і SLS з видаленням плинного залишку, а також для вентиляції ливарних моделей), адаптувати до навколишньої геометрії та моделювати його для 3D-друку виробів практично без підтримок (самопідтримуючих). Мала маса з високою жорсткістю такого метаматеріалу, зменшить споживання пов'язаної з ним енергії та вуглецевий слід [8, 9].

Моделювання у вказаній програмі доступно з регулюванням щільності в інтервалі від 2 до 22. Так, на рис. 1 приведено приклади змодельованих структур зі щільністю 5,6 і поверхнями з назвами «вулкан» (а) та «павутина» (б). В процесі 3D-моделювання об'єкту в заданих геометричних конфігураціях (конвертах) вибирають, приміром, такі показники, як вказано у вигляді підписів на рис. 2 [9].

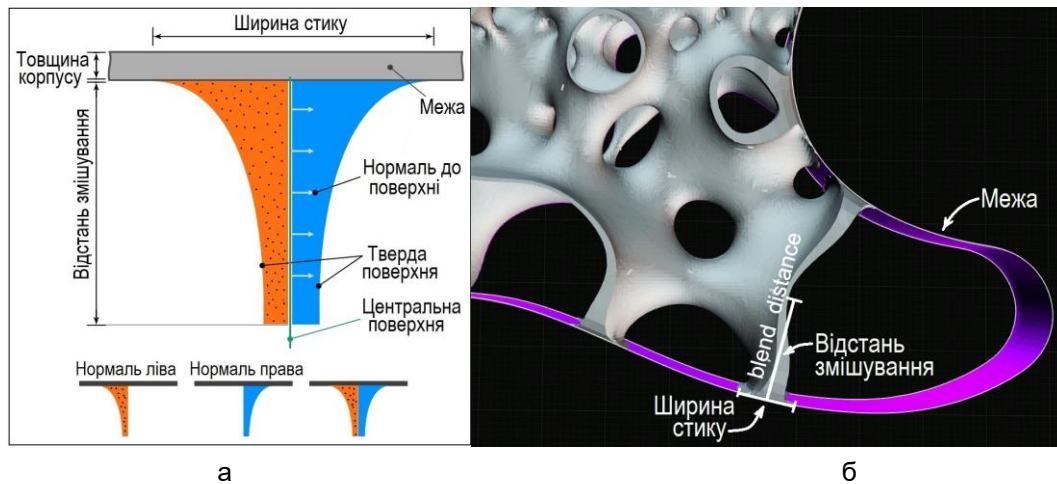


Рисунок 2. Показники, які вибирає дизайнер при моделюванні: а – схема стикування з гладкою плоскою поверхнею (конвертом); б – моделювання з криволінійною поверхнею

Якщо при проектуванні пористої моделі товщину стінок в певному «полі» дизайнером не задано, то товщина оболонок пор відповідно до щільності (Density Reference Thickness, DRT) виробу визначається однаковою для всіх стінок, за замовчуванням програма встановлює щільність розміром 5,6. Якщо щільність задано лише одним значенням в будь-якій точці, то відсоток щільності всього

друкованого виробу відповідає цьому значенню. Чим нижче значення DRT, тим складнішою, згідно програми, стає геометрія пористої поверхні і збільшується тривалість її обчислення. Різні значення щільності, вказані в певних точках, програма інтерполює в просторі між цими точками (рис. 3) [9]. Крім того, дизайнер може вказувати різну товщину стінки у вибраних ним точках (рис. 4) [9].

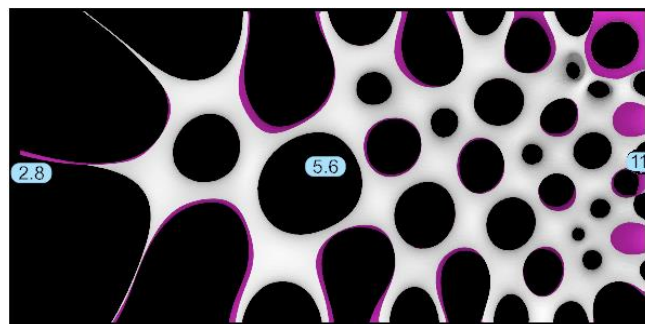


Рисунок 3. Моделювання структури з різною щільністю 2,8 - 5,6 - 11 в трьох точках

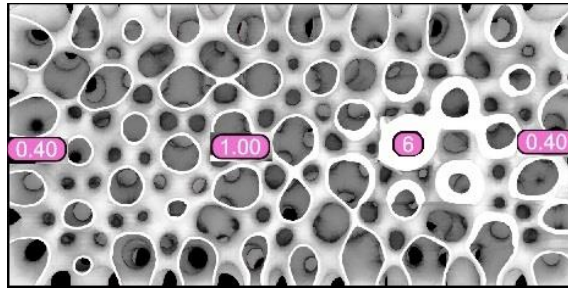


Рисунок 4. Структура з різною товщиною стінки 0,40 - 1,00 - 6 - 0,40 в чотирьох точках

Програма дозволяє додати порожнину заданого радіусу у вказаній точці (рис. 5) [9].

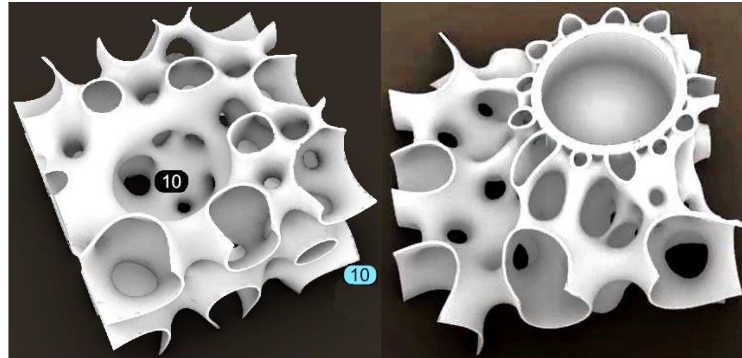


Рисунок 5. Моделі з додаванням порожнин у вказаних точках з заданими радіусом та місцем для розміщення циліндра

Також показана структура з різною товщиною стінок і зміщенням поверхні (рис. 6) [9].

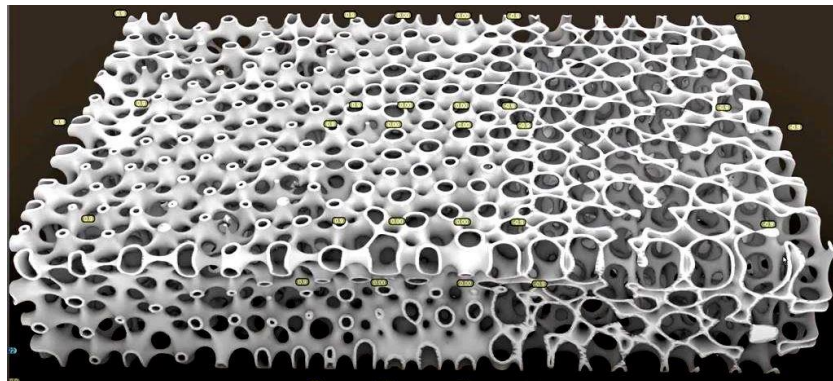


Рисунок 6. Структура моделі з різною товщиною стінок і зміщенням поверхні

Приклади 3D-друкованих моделей показано на рис. 7 [9], де моделі (а - в) виконано на принтерах методом SLA/SLS з пошаровим твердненням рідкої чи порошкової смоли, а на рис. 7, г - друкована екструзійним методом FDM на принтері «BABbu Lab»

прикраса з орнаментом із пластика PLA крізь насадку з прохідним діаметром 0,6 мм і товщиною нанесених шарів 0,12 мм без підтримок та без заповнення, а також з висотою 15 мм суцільного краю в нижній частині (з сайту <https://spherene.ch>).

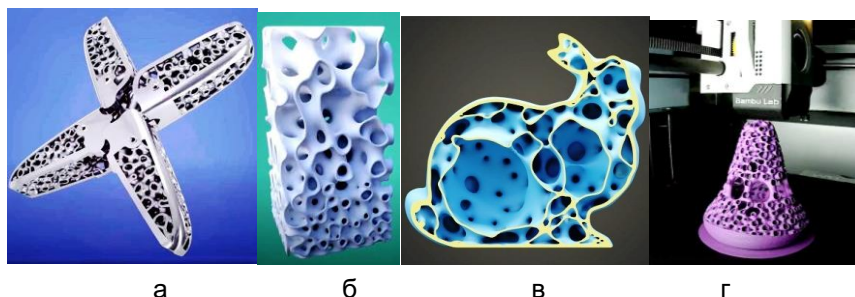


Рисунок 7. Полімерні моделі із структурою у вигляді сференів: а - хрестовина з відкритою пористістю; б - пористий паралелепіпед; в - модель кролика з гладкою поверхнею (в розрізі); г - друкування прикраси з орнаментом.

Крім того, автором статті з допомогою програми sphereRHINO було спроектовано модель «гачок» з пористою внутрішньою структурою (рис. 8, а, показано без задньої стінки для демонстрування пор), а також на настільному принтері типу «BABbu Lab

A1 mini BL0007U» надруковано методом FDM дослідні сференові тонкостінні структури з філаменту PLA (рис. 8 б) для дослідження можливості заповнення ними стінок ливарних моделей.

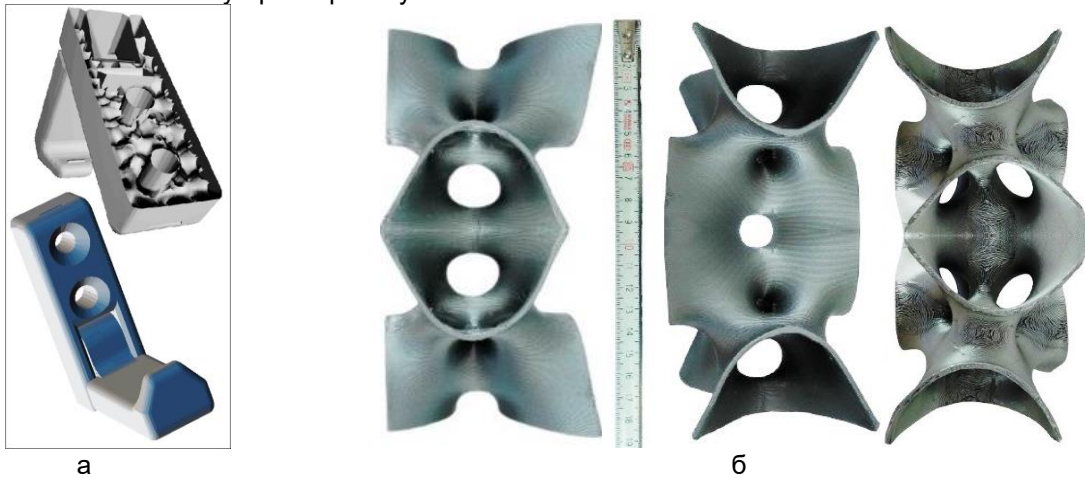


Рисунок 8. Приклади проектування моделей гачка (а) та друкування пористих структур (б)

3D-друкування з полілактиду PLA є найбільш недорогим за вартістю і популярним методом FDM пошарового наплавлення при виготовленні моделей на 3D-принтерах [14, 15]. PLA – біорозкладний термопластичний поліефір, що одержують на основі молочної кислоти. Він використовується для 3D-друку та у виробництві біопластику, є відносно недорогим матеріалом, легко друкується і має достатньо високі механічні показники для друку ливарних моделей. Густина PLA - 1240 кг/м^3 і температура кипіння - 227°C .

Для порівняння, матеріал ППС, що є традиційним для моделей при ЛГМ-процесі, виготовлений з полістиролу з хімічною формулою $(\text{C}_8\text{H}_8)_n$, густина якого складає 1050 кг/м^3 , а температура кипіння - в інтервалі $240\text{-}270^\circ\text{C}$ і залежить від його молекулярної маси та інших факторів. При температурі вище 239°C він переходить у в'язкоплинний рідкий стан, а при температурі 300°C починається незворотна деполімеризація полістиролу [16].

Характеристики PLA і полістиролу достатньо

схожі, але ППС має закриті пори, а з PLA доцільно друкувати моделі з відкритими порами, які складають газопроникне тіло моделі (знизу вгору) з установленням зверху трубчастого випору. Крізь цей випор сполучають серцевину моделі з вакуумом у порах піску форми, яку традиційно вакуумують при ЛГМ, та відкачують гази при газифікації моделі, разом з тим досягаючи ефекту лиття металу методом вакуумного всмоктування [5, 17].

Крім дослідження сференових структур, у ФТІМС НАН України виконано друкування з PLA (рис. 9) ажурної сітчастої структури (ліворуч) та друкованої кульки для пінг-понга (праворуч) масою до 4 г. Тонкий друк комірчастих каркасів з товщиною «гілки» близько 1 мм демонструє потенціал для заповнення такими каркасами стінок моделей для ЛГМ. Для друку структур (рис. 8, б та 9) з PLA застосовували недорогі настільні екструзійні принтери, відомі як «шкільні», що підкреслює доступність та економічність друкування моделей для ЛГМ.

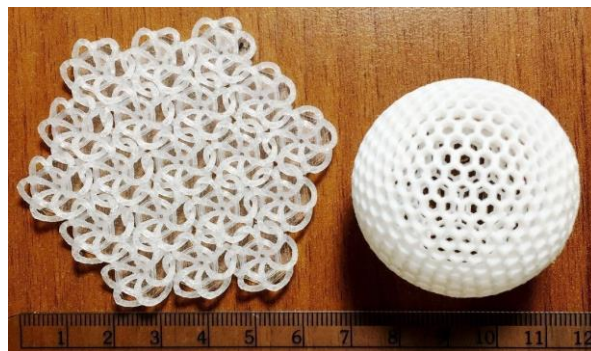


Рисунок 9. Друковані з PLA варіанти каркасних легковагих структур

Загалом, операції 3D-друку моделей і виливання металовиробу методом ЛГМ мають таку послідовність. Після отримання файлу з цифровим

кресленням ливарник протягом доби програмними засобами створює цифрову модель, за якою друкується полімерна ливарна модель. До цієї моделі

додають модель ливниково-живильної системи, фарбують і подають на формовку, що триває до двох діб. Ще протягом однієї доби методом ЛГМ виготовляється піщана форма і заливається металом. Таким чином, протягом 4-5 діб від отримання файлу з кресленням можливе отримання дрібних та середніх виливків. Ця методика дозволяє проектувати та друкувати пористі ливарні моделі, сумісні з існуючими процесами ЛГМ, без зміни формуально-ливарної оснастки та обладнання. Заміна моделей з ППС, виготовлених у металевих прес-формах (включно з проектуванням та виготовленням прес-форм і потім моделей по них), на 3D-друковані моделі суттєво скорочує тривалість виробництва ливарних моделей.

Висновки. Розглянутий метод моделювання та друкування за програмою SphereneRHINO є одним з перспективних для друкування ливарних моделей з відкритими порами (на противагу з ППС, в якого пори закриті). При цифровому конструюванні ливарних моделей дизайнер спочатку визначає модель у САПР, яка потім служить обчислювальною оболонкою, у якій генеруються сферичні геометричні пористі структури за методом МП. Після цього 3D-принтери автоматично друкують такі моделі для ЛГМ, що можливо навіть у цілодобовому режимі.

Цей метод дозволяє регулювання щільності, товщини стінок і геометрії друкованих пор, обмежених (чи не обмежених) гладкою поверхнею корпусу моделі, що є важливим для локального чи

варіативного регулювання міцності, зменшення ваги друкованих ливарних моделей одночасно зі створенням трансляційної пористості (вентканалів) для спрямованого виводу (знизу вгору) газу при газифікації моделей. Хоча наразі ще важко друком конкурувати по легковогості з ППС-моделями, однак друкування газопроникних моделей дозволяє підвести трубою-випором і крізь пори моделі вакуум з ливарної форми під час її заливання металом до зони газифікації моделі та відкачувати газ за допомогою вакууму. По-перше, це сприяє виводу продуктів газифікації із зони контакту їх з металом, мінімізуючи їх негативний вплив на метал. По-друге, створюється ефект лиття металу методом вакуумного всмоктування, бо з виводом газів у вакуумований пісок форми розрідження газів діє на метал. Модель проектується на основі принципу «чим більше газів, тим більше має бути їх розрідження для виведення з робочої порожнини ливарної форми». Таким чином, розглянуте застосування друкованого метаматеріалу для ЛГМ надає моделі легковогості, трансляційної пористості і суттєве скорочення термінів проектування та виробництва як передумови реалізації концепції продажу не лише продукту, але й послуг. Останнє сприяє адаптивності підприємств до змін ринку, реалізації моделі виробництва «на вимогу», ключовим інструментом якої стає АВ, як елемент цифровізації процесу лиття за високоточними друкованими моделями з мінімізацією витрат часу та ресурсів.

Перелік посилань

- Stackpole B. AM Rides On-Demand Manufacturing Wave. URL: <https://digitalengineering247.com/article/AB-rides-on-demand-manufacturing-wave> (дата звернення: 12. 11. 2024).
- Gibson I., Rosen D., Stucker B. & Khorasani M. Additive manufacturing technologies. 2021. Vol. 17. P. 160-186. Cham, Switzerland: Springer. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7> (дата звернення: 12. 11. 2024).
- Rasmussen N.D. A Digital Revolution is Transforming Foundries Worldwide. *Foundry Management & Technology*. 2024. Jan./Feb. P. 27-28.
- Digitalisation of foundries – the path towards the future. URL: <https://www.foundrygate.com/#/news/5658/digitalisation-of-foundries-%25E2%2580%2593-the-path-towards-the-future> (дата звернення: 27.09.2022).
- Дорошенко В.С., Янченко О.Б. Застосування комп'ютерних систем для проектування та 3D-друку ливарної моделі з вентиляційними каналами в її стінках. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2023. № 3. С. 53-58. DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-58-3-53-58>.
- Industry 4.0: How to navigate digitization of the manufacturing sector. McKinsey Digital. URL: https://www.mckinsey.de/files/mck_industry_40_report.pdf (дата звернення: 20.03.2025).
- Lawler F. Additive Enhances Lost FoAB Casting Process for Metal Manufacturing. URL: <https://www.additivemanufacturing.media/articles/enhances-lost-foAB-casting-process-for-metal-manufacturing> (дата звернення: 28.05.2024).
- Hendrixson S. Metamaterial with Geometry Derived from Spheres. *Additive Manufacturing*. 2024. May. P. 40.
- SphereneRHINO Public Beta Documentation. 11.10.2023. URL: <https://spherene.ch/documentation/sphereneRHINO/> (дата звернення: 12. 11. 2024).
- Бродовий О.В., Дорошенко В.С., Янченко О.Б. 3D-проектування пористих ливарних моделей в програмі Rhinoceros 8. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2024. № 1. С. 119-126. DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2024-59-1-119-126>.
- Meeks W.H. The Theory of Triply Periodic Minimal Surfaces. *Indiana University Mathematics Journal*. 1990. 39. No. 3. P. 877-936.
- Triply-periodic minimal surfaces. URL: <https://schoengeometry.com/e-tpms.html> (дата звернення: 12. 11. 2024).
- Wangpraseurt D., You S., Azam F. et al. Bionic 3D printed corals. *Nat Commun* 11, 1748 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15486-4>.
- Калюжний П.Б., Дорошенко В.С., Нейма О.В. Лиття за комбінованими полімерними моделями, що газифікуються. *Процеси лиття*. 2023. № 2. С. 49-55. DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2023.02.049>.
- Дорошенко В.С., Калюжний П.Б., Коломійцев С.В. Приклади 3D-технологій виробництва металовиробів і полімерних моделей. *Процеси лиття*. 2021. № 4. С. 48-54. DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2021.04.048>.
- Шуляк В.С. Литьё по газифицируемым моделям. Санкт-Петербург: Профессинал, 2007. 405 с.

17. Дорошенко В.С., Калюжний П.Б., Дьяченко М.М. Лиття за газопроникними полімерними моделями, що газифікуються з відкачуванням по вентканалах газів з робочої порожнини форми. *Процеси лиття*. 2024. № 2. С. 19-28. DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2024.02.019>.

References

1. Stackpole B. AM Rides On-Demand Manufacturing Wave.
2. Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B., Khorasani, M., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. Additive manufacturing technologies. 2021. Vol. 17. P. 160-186. Cham, Switzerland: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>.
3. Rasmussen, N. D. A (2024). Digital Revolution is Transforming Foundries Worldwide. *Foundry Management & Technology*, Jan./Feb., 27-28.
4. Digitalisation of foundries – the path towards the future. URL: <https://www.foundrygate.com/#/news/5658/digitalisation-of-foundries-%25E2%2580%2593-the-path-towards-the-future>.
5. Doroshenko, V. S., Yanchenko, O.B. (2023). Application of computer systems for design and 3D printing of a foundry model with ventilation channels in its walls. *Information technologies and computer engineering*, 3, 53-58. <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-58-3-53-58>.
6. Industry 4.0: How to navigate digitization of the manufacturing sector. McKinsey Digital. URL: https://www.mckinsey.de/files/mck_industry_40_report.pdf.
7. Lawler F. Additive Enhances Lost FoAB Casting Process for Metal Manufacturing.
8. Hendrixson S. (2024). Metamaterial with Geometry Derived from Spheres. *Additive Manufacturing*, May, 40.
9. SphereneRHINO Public Beta Documentation. 11.10.2023. URL: <https://spherene.ch/documentation/sphereneRHINO/>.
10. Brodovy, O. V., Doroshenko, V. S., Yanchenko, O. B. (2024). 3D design of porous foundry models in the Rhinoceros 8 program. *Information technologies and computer engineering*, 1, 119-126. <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2024-59-1-119-126>.
11. Meeks, W. H. (1990). The Theory of Triply Periodic Minimal Surfaces. *Indiana University Mathematics Journal*.. 39(3), 877-936.
12. Triply-periodic minimal surfaces. URL: <https://schoengeometry.com/e-tpms.html>.
13. Wangpraseurt, D., You, S., Azam, F. et al. (2020). Bionic 3D printed corals. *Nat Commun*, 11, 1748 <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15486-4>.
14. Kalyuzhny, P. B., Doroshenko, V. S., & Neyma, O. V. (2023). Casting using combined polymer models that gasify. *Casting processes*, 2, 49-55. <https://doi.org/10.15407/plit2023.02.049>.
15. Doroshenko, V. S., Kalyuzhny, P. B., & Kolomyitsev, S. V. (2021). Examples of 3D technologies for the production of metal products and polymer models. *Casting processes*, 4, 48-54. <https://doi.org/10.15407/plit2021.04.048>.
16. Shulyak, V. S. (2007). Casting on gasifiable patterns. St. Petersburg: Professional.
17. Doroshenko, V. S., Kalyuzhny, P. B., Dyachenko, M. M. (2024). Casting using gas-permeable polymer patterns that are gasified with pumping out gases from the working cavity of the mold through vent channels. *Casting Processes*, 2, 19-28. <https://doi.org/10.15407/plit2024.02.019>.

Надіслано до редакції / Received: 24.02.2025

Прийнято до друку / Accepted: 30.05.2025