УДК 621.74.045:621.9.04:004.92

В. С. Дорошенко, О. Б. Янченко, В. В. Браславський

НОВІ ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ ДЛЯ 3D-ДРУКУ ПОЛІМЕРНИХ МОДЕЛЕЙ БЕЗ ОПОР ДЛЯ ЛИТТЯ МЕТАЛУ ЗА МОДЕЛЯМИ, ЩО ГАЗИФІКУЮТЬСЯ

Анотація. *У ливарному виробництві для процесу лиття металу за моделями, що газифікуються (ЛГМ), використання адитивних методів відкриває суттєві технологічні переваги. Запропоновано спосіб FDM 3D-друку оболонкових моделей із полілактиду (ПЛА) з внутрішньою сіткою розпірок, що забезпечує ефективну густину на рівні традиційного пінополістиролу (31,5 кг/м³). Для вирішення проблеми провисання горизонтальних і консольних елементів без застосування традиційних опор розроблено два методи: випаровувального охолодження «Vape3D Print» та механічний спосіб рухомої відкидної фальш-опори з неперервною стрічкою.*

Ключові слова: *лиття за моделями, що газифікуються, адитивне виробництво, полілактид, 3D-друк, метод «Vape3D Print», відкидна фальш-опора.*

Abstract. *In foundry production for the lost foam casting (LFC) process, the use of additive methods offers significant technological advantages. A method of FDM 3D printing of polylactic acid (PLA) shell models with an internal strut grid has been developed, providing an effective density comparable to traditional expanded polystyrene (31.52 kg/m³). To solve the problem of sagging horizontal and cantilever elements without using traditional supports, two methods are proposed: the «Vape3D Print» evaporative cooling method and the mechanical method of a movable hinged false support with a continuous belt.*

Keywords*: lost foam casting, additive manufacturing, polylactic acid, 3D printing, «Vape3D Print» cooling, hinged false support.*

Вступ. У сучасному ливарному виробництві процес лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ), потребує переходу на адитивні технології виготовлення разових моделей. Традиційні моделі з пінополістиролу (ППС) мають низьку густину (25–40 кг/м³), проте створення складних або дрібносерійних оснасток вимагає дорогих прес-форм. Прямий 3D-друк суцільних полімерних моделей є неприйнятним через надмірну матеріаломісткість і надлишкове газовиділення при заливанні металу. Для вирішення цієї проблеми розроблено концепцію FDM 3D-друку оболонкових (порожнинних) моделей із біорозкладного полілактиду (ПЛА) з регулярною внутрішньою сіткою розпірок. Як дослідну модель обрано пластину 100×100×10 мм із зовнішньою оболонкою завтовшки 0,1 мм та внутрішньою сіткою розпірок перерізом 0,2×0,2 мм із кроком 5,0 мм. Загальна розрахункова маса такої моделі становить 3,152 г при об'ємі 0,0001 м³, що дає ефективну густину (середня густина матеріалу, яка враховує як об'єм його твердої матриці - скелета, так і об'єм усіх пор усередині нього) 31,52 кг/м³ (повністю відповідає нормативам для ППС).

Проте критичною перешкодою при друку внутрішньої просторової сітки є гравітаційне провисання горизонтальних розпірок у повітрі без використання технологічних опор, видалення яких із замкнених порожнин неможливе. Для усунення цього обмеження запропоновано два інноваційні підходи.

1. Випаровувальний метод інтенсивного охолодження «Vape3D Print» [1].

Перший метод спрямований на мікроструктурну швидку фіксацію екструдату в повітрі. Спосіб полягає в дозованій подачі мікрокрапель води або водно-спиртового розчину безпосередньо в зону екструзії на відстані 0,5–1,0 мм від зрізу сопла 3D-принтера. Завдяки високій питомій теплоті випаровування води (r = 2256 Дж/г) відбувається інтенсивний відбір тепла від розплаву полімеру. Мікрокрапля миттєво випаровується, викликаючи фазове загартування нитки ПЛА, яка твердне за частки секунди без утворення залишкової вологи. Це забезпечує стабільний та швидкий друк горизонтальних елементів та консолей без провисання.

Оскільки штатна комплектація серійних принтерів не включає пристрій дозованого подання рідини, у дослідному виконанні воду вручну наносили за допомогою шприца. Серед варіантів

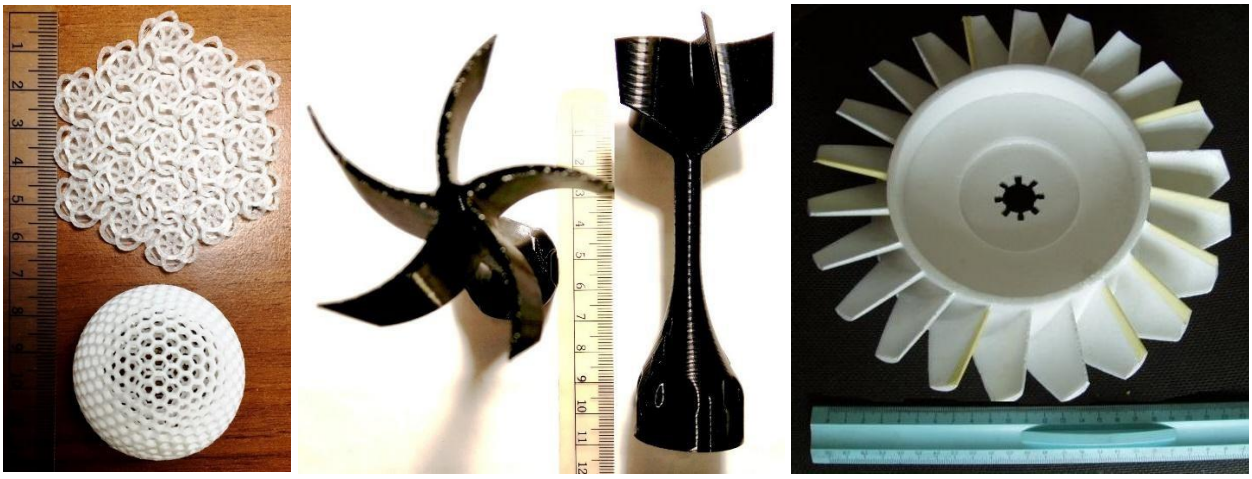
інтенсифікації охолодження розглянули застосування газорідких дисперсій (повітряного потоку, зволоженого аерозолем) або газів від випаровування рідкого азоту чи сублімації твердого діоксиду вуглецю (сухого льоду). При цьому дозоване підмішування їхніх газоподібних фаз до повітряного струменя забезпечує регулювання як температури, так і об'ємної витрати холодоагенту.

2. Механіко-кінематичний метод відкидної рухомої фальш-опори.

Другим, альтернативним або комбінованим рішенням є розробка активного механічного пристрою для горизонтального друку — відкидної рухомої фальш-опори із замкненою гнучкою стрічкою на двох роликах, змонтованої безпосередньо на корпусі екструдера. Кінематика циклу полягає у тому, що під час вертикального друку поверхневих модельних оболонок легка консольна опора шарнірно піднята вгору до корпусу екструдера і не заважає роботі головки. На початку друку горизонтальної розпірки опора автоматично опускається і точно стає під вихідне сопло, утворюючи тимчасову рухому підкладку.

У процесі руху екструдера гнучка стрічка на роликах робить різкий перегин (зворотний поворот) на задньому ролик-згині, реалізуючи ефект відлипання стрічки від затверділого екструдату на радіусі (Peeling Effect). Завдяки цьому радіусу стрічка чиста й ефективно «відстає» від щойно сформованої та охолодженої розпірки, запобігаючи будь-якому налипанню чи деформації її геометрії. Сама стрічка, постійно рухаючись по замкненому контуру в повітрі, встигає охолоджуватися, виконуючи функцію м'якого тепловідводу. Застосування цих двох під-видів друку дозволяє повністю автоматизувати адитивне виготовлення легких ливарних моделей із ПЛА для ЛГМ-процесу без використання внутрішніх чи зовнішніх підтримувальних конструкцій для горизонтальних елементів.

Оскільки FDM 3D-друку (настільний принтер Bambu Lab A1 mini) доступно виготовлення тонкостінних моделей (рис. 1, а, б), а способом ЛГМ освоєно лиття таких робочих колес – крильчаток за моделями з пінополістиролу (рис. 1, в), то наступним етапом досліджень планується освоєння друкування таких крильчаток з низькою ефективною густиною і відпрацювання ЛГМ процесу з перспективою лиття моноколіс компактних турбореактивних силових агрегатів різного призначення та газотурбінних двигунів для малогабаритних електрогенераторів.



а б в

Рис. 1. Приклади: 3D-друку тонкостінних виробів (а, б) та моделі лопатевого моноколеса з пінополістиролу (в), виготовленого для процесу ЛГМ (фото авторів)

Висновки. Розроблено нові технологічні рішення для FDM 3D-друку каркасно-оболонкових тонкостінних моделей із внутрішньою сіткою розпірок. Застосування випаровувального охолодження «Vape3D Print» та (або) кінематичного пристрою відкидної фальш-опори забезпечує високошвидкісний 3D-друк горизонтальних і просторових елементів без опор. Це гарантує задану ефективну густину моделі (на рівні 31,0–32,0 кг/м³) та високу точність моделей при виробництві

способом ЛГМ виливків широкого профілю із залізовуглецевих і кольорових сплавів. Інтеграція 3D-друку в ЛГМ-процес забезпечує швидку цифрову переналагоджуваність та скорочення підготовки виробництва нової номенклатури виливків від кількох місяців до десятка годин, а також перехід до гнучкого кастомізованого виготовлення деталей на вимогу (manufacturing on demand), у тому числі на потреби Сил оборони.

Список використаних джерел:

1. Дорошенко В. С., Небожак І. А. FDM 3D-друк ливарних моделей з водяним охолодженням та без підтримувальних опор // Сучасні технології промислового комплексу – 2026: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (Херсон, Хмельницький, 2026 р.). — Херсон–Хмельницький: ХНТУ, 2026. — Вип. 10. — С. 82–84.

Дорошенко Володимир Степанович *- доктор технічних наук, провідний науковий співробітник відділу фізико-хімії ливарних процесів Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України, м. Київ, вул. Акад. Вернадського, буд. 34/1, інд. 03142, e-mail: doro55v@gmail.com, ORCID https://orcid.org/0000-0002-0070-5663*

Янченко Олександр Борисович *– кандидат технічних наук, доцент кафедри військової підготовки Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, буд. 95, інд. 21021, e-mail: 1961yab@gmail.com,*

ORCID https://orcid.org/0000-0002-3888-3772

Браславський Владислав Віталійович – *студент групи 01-25 (ВОС 063402) кафедри військової підготовки Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, буд. 95, інд. 21021, e-mail: 1961yab@gmail.com.*

Volodymyr Stepanovych Doroshenko *– Doctor of Sciences (Engineering), Lead Researcher, Department of Physical Chemistry of Casting Processes, Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine, 34/1 Acad. Vernadsky Ave., Kyiv, 03142, e-mail: doro55v@gmail.com, ORCID https://orcid.org/0000-0002-0070-5663*

Oleksandr Borysovych Yanchenko *– Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Military Training, Vinnytsia National Technical University 95Khmelnytske Shosse, Vinnytsia, 21000, Ukraine, e-mail: 1961yab@gmail.com, ORCID https://orcid.org/0000-0002-3888-3772).*

Vladyslav Vitalyovych Braslavskiy *– student of group 01-25 (VOS 063402) of the Department of Military Training of Vinnytsia National Technical University, 95Khmelnytske Shosse, Vinnytsia, 21000, Ukraine, e-mail: 1961yab@gmail.com.*