

Дорошенко В.С., Калюжний П.Б.
(ФТІМС НАН України, Київ)

ВЕНТИЛЬОВАНІ, НАПОВНЕНІ ПІНОПЛАСТОМ ДРУКОВАНІ МОДЕЛІ

E-mail: doro55v@gmail.com

Застосування 3D-друку ливарних моделей для лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ), підвищує можливість змінювати як конфігурацію ливарної продукції, так і конструкцію моделей виключно за рахунок внесення змін в цифрову модель продукції без переформатування виробничого базису. Впровадження друкованих моделей значно скорочує тривалість підготовки виробництва нової продукції, бо воно обходиться без оснастки (прес-форм) для виготовлення ливарних моделей, яка є нерідко складною і дорогою за вартістю. Автоматизований 3D-друк з цифрових даних ливарних моделей (навіть разової конструкції за індивідуальним замовленням чи складної комплекції) і по ним – виливків все більше є предметом досліджень провідних ливарних компаній світу і відповідає загальному тренду цифровізації ливарного виробництва.

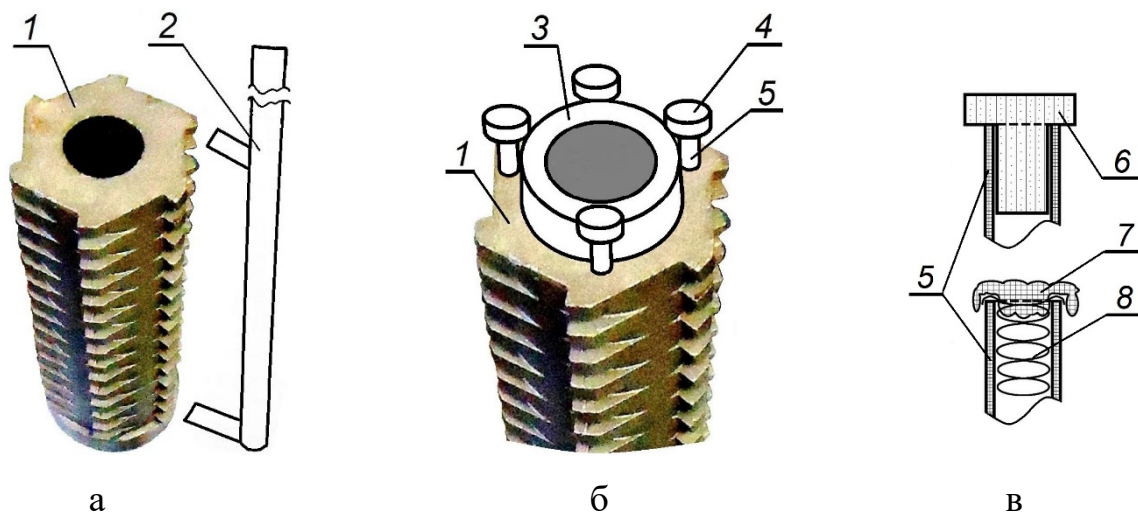
Проте, проблема полягає в тому, що друковані полімерні моделі мають більшу густину і, відповідно, газотвірність, ніж традиційні моделі з ППС, що перешкоджає їх друку для ЛГМ. Надмірний тиск газів від газифікації більш масивної (проти моделі з пінополістиролу – ППС) друкованої моделі може призвести як до викидів металу з ливникової системи, так і до гальмування заповнення ним форми з утворенням браку виливків по недоливам. А також сучасний друкований матеріал моделей дає більший вуглецевий (коксовий чи зольний) залишок, ніж ППС, що також негативно впливає на якість виливків.

Тому з метою оптимізації газового режиму ЛГМ при проектуванні друкованої моделі застосували три вигідних складових: 1) виконання вентканалів в конструкції моделі; 2) при комп'ютерному проектуванні внесення цих каналів в цифрове креслення моделі; 3) підведення до вентканалів газового розрідження з піщаного середовища ливарної форми за принципом «чим більше газів, тим інтенсивніше їх відкачування». Оскільки 3D-друк лише починає застосовуватись

для ЛГМ, то друкування в моделі вентиляційних каналів вздовж її стінок по напрямку течії металу являється новим рішенням.

При заливанні розплавленим металом вакуумованої форми з газифікацією друкованої моделі з відведенням газових продуктів газифікації крізь канали у пори піску форми ці канали продовжують полімерними трубками, вихідні кінці яких закривають газопроникним вентами, що не пропускають пісок. Крім того, в разі застосування вставок з ППС в 3D-друковану модель (для зниження її маси) канали для виводу газів можуть друкувати у вигляді борозенок, що утворюють канали по стику з цими вставками і друкованою частиною моделі.

Полімерні трубки застосовували з міцними стінками (поліпропіленові), щоб не прогинались від дії на них вакууму в піску форми, або з цією ж метою вставляли в них спіраль з металевого дроту, або газопроникні пробки з піщаної суміші, які служили вентами. Проектування друкованої моделі для розробленого нами способу (заявка u202305216 України) показано на рис. 1 при виготовленні моделі зубчастого валка 1, що в парі з таким же валком служить для подавання волокнистих матеріалів.



1 – валок; 2 – модель ливникової системи; 3 - патрубок з ППС; 4 – вента; 5 – трубка; 6 – піщана пробка в якості венти; 7 – вента з вати; 8 – спіраль з дроту

Рис. 1. Валок і проект конструкції модельного комплексу: а – валок з ливниковою системою; б – верхня частина моделі валка; в – венти в поздовжньому розрізі

Вирізати на 3D-фрезері модель цільною такої конструкції з блочного ППС складно, тому її вирізають і склеюють з частин. Але 3D-друк дозволяє виготовити цільною зовнішню частину моделі складного геометричного профілю. Для зменшення маси моделі її внутрішню частину заповнили циліндричним патрубком 3 з ППС густиною $15-18 \text{ кг/м}^3$. Варіант моделі ливникової системи 2 з ППС схематично показано поруч з валком.

На рис. 1, б показано верхню частину моделі валка 1 з частиною патрубка 3 з ППС. Робочою частиною валка є зовнішня, а внутрішній центральний канал служить для полегшення маси вилівка і при виготовленні ливарної форми заповнюється піском. На внутрішній стороні друкованої частини моделі на стику з зовнішньою поверхнею патрубка 3 вздовж його осі при друкуванні виконано борозенки (не показано), які при стику з зовнішньої поверхнею патрубка 3 утворюють повздовжні вентканали, у які зверху вставлено чотири полімерні трубки 5 з вентами 4. Приклади виконання вент показано на рис. 1, в. Виготовлена з піщаної суміші вента 6 служить пробкою, а вента 7 виконана з вати, що опирається на спіраль 8 з металевого дроту. В останньому варіанті замість трубки можливе утворення патрубка обертанням плівки «скотч» навколо спіралі 8. Венту-пробку 6 виготовили з піщано-рідкоскляної суміші з високою газопроникністю, а вента 7 з вати утримується стінками трубки і спіраллю, яка потрібна в разі застосування м'якої трубки. Аналогічно часто армуються гнучкі трубопроводи побутових пилососів. Порівняно з циліндричними вентканалами друкування їх у вигляді прямолінійних борозенок простіше, тому в нашому варіанті частину поверхні вентканалу утворено патрубком 3, вставленим в зовнішню друковану формотворну частину моделі 1.

Для випробування способу ЛГМ моделі друкували методом пошарового наплавлення (FDM) з полілактиду (PLA) – біорозкладного термопластичного поліефіру, який є одним з найбільш поширених і недорогих за вартістю термопластиків для друку. PLA має густину 1240 кг/м^3 , температуру плавлення $150-160^\circ\text{C}$, температуру кипіння 227°C . Принцип роботи FDM заснований на плавленні та екструзії термопластичних полімерних ниток (філаментів) і

подальшому осадженні розплавленого матеріалу шар за шаром для формування деталі, що використовується на найбільш поширених нескладних принтерах.

Після виготовлення 3D-друковану модель валка 1 з ливниковою системою 2, вставкою 3 і трубками 5 покрили протипригарною фарбою, не фарбуючи трубки і венти. При формуванні в контейнері моделі сухим піском з вібраційним ущільненням контейнер зверху загерметизували синтетичною плівкою, вивели крізь неї верхню частину моделі ливникової системи і поставили на неї керамічну воронку для спрямування струменю металу.

Заливання розплаву високоміцного чавуну у форму виконували при її вакуумуванні, під'єднавши до трубопроводу цехової вакуумної системи, в якій підтримували залишковий тиск повітря на рівні 40-50 кПа. При підведенні розплаву металу по ливниковій системі головним чином знизу до моделі, він газифікував модель при русі знизу вгору. Гази від газифікації по вентканалах відкачувались крізь трубки 5 і венти 4 в пісок форми і попадали крізь трубопровід від форми до вакуумної системи цеху, де проходили очищення.

Рівень вакууму на поверхні венти наближався, але був нижче його рівня на поверхні моделі, залежав від відстані венти до вакуумного фільтра контейнерної форми. Газопроникність вент була вищою, ніж газопроникність типових для ЛГМ протипригарних фарб. При заливанні металу за рахунок інтенсивної газифікації моделі рівень залишкового газового тиску в зазорі «метал-модель» був вищим, ніж на поверхні «модель-форма», що забезпечувало стабільність стінки форми в момент контактування її з металом. Після охолодження виливка в формі протягом кількох годин і видалення його з неї отримали виливок високої якості. Верхній надлив від виступу патрубків 3 і металеві стовпчики від газифікації трубок 5 видалили механічним способом.

Для ЛГМ-процесу за моделями, які мають більшу масу на одиницю об'єму і дають більше газів при їх газифікації, ніж традиційні ливарні моделі з ППС, вставки з ППС і вентканали зменшують масу моделі, а останні інтенсифікують відкачування газів завдяки вакууму форми. Протягом всього процесу заливання форми завдяки вакууму в її піску крізь ці канали і трубки з вентами примусово

видаляються (відсмоктуються) гази у пори піску форми. Водночас проникнення крізь канали низького газового тиску створює ефект вакуумного всмоктування металу, що поліпшує заповнення форми і запобігає появі дефектів як недоливи, особливо в тонкостінних виливках.

Таким чином, застосування принципу «чим більше газів від газифікації моделі, тим більше слід застосувати засобів їх спрямованого видалення (в напрямку руху металу) під впливом вакууму форми з ефектом вакуумного впливу на метал» сприяє залученню в ЛГМ-процес 3D-друку з використанням його можливості автоматизованого виготовлення вентильованих моделей, або моделей з направленою пористістю.

Моделі з каналами направленого газовідводу під впливом вакууму за своєю функцією в ідеалі можна розглядати як аналог вакуумпроводу для відкачки продуктів від власної газифікації. Варіанти заповнення пористого тіла (серцевини) друкованих моделей (рис. 2, з сайту <https://all3dp.com>) відомі своєю різноманітністю. Залишається при друці вентильованої моделі орієнтувати канали пор по напрямку виходу газів і заповнення форми металом. Відкачування газів також дозволить разом з ними вивести дрібні частинки сажі чи так званого коксового або зольного залишку, що запобігатиме їх негативному впливу на деякі сплави, що можуть з ними реагувати.

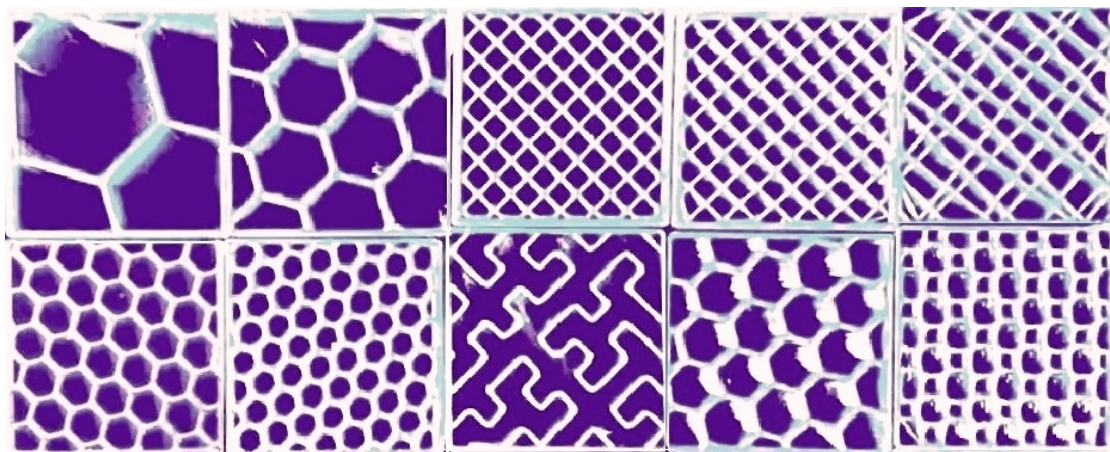


Рис. 2. Деякі типові приклади заповнення друкованих виробів

Розширення лиття за друкowanими моделями сприятиме виробництву широкої номенклатури виливків, особливо різноманітних одиничних чи дрібних партій виливків за індивідуальними замовленнями покупців. Останнє відповідає концепції «виробництво як послуга» (Manufacturing as a Service, MaaS). Адаптація ливарного виробництва до 3D-друку розширить, зокрема по мережі Інтернет, пряму взаємодію з покупцем товару, який проектується за його індивідуальним цифровим проектом, зокрема через NFC-систему (бездротової передачі даних та платежів).

Таким чином, лиття за вентильованими полімерними моделями, що газифікуються з відкачуванням по вентканалах газів з робочої порожнини форми, розкриває ряд потенційних поки нереалізованих можливостей для автоматизації і цифровізації виробництва металопродукції. Розглянутий спосіб такого виробництва дозволяє як регулювати заповнення форми металом, що впливає на якість виливків, так і виготовляти металовироби складної конфігурації з досить швидким друкуванням їх моделей в автоматичному режимі по цифровим кресленням, що відповідає зростаючому тренду цифровізації і автоматизації ливарних процесів. Це дозволяє отримати сумарну вигоду як від оперативного 3D-друку ливарної моделі, так і від нетривалих процесів формовки та вибивки виливків з сухого піску ливарних форм при ЛГМ. При цьому ресурсоефективність оборотного застосування формувальних матеріалів без зв'язувальних реактивів поєднується з цифровою трансформацією ЛГМ без зміни діючих стандартів контролю металопродукції, що нерідко супроводжує способи 3D-друку металовиробів. Впровадження у виробництво 3D-технологій відкриває можливості Інтернет-комунікації виробника з покупцем товару, який проектується за індивідуальним цифровим кресленням покупця і швидко виготовляється виробником. При цьому поєднання традиційних ливарних процесів з новими цифровими суттєво скорочує тривалість переходу від створення пілотних зразків продукції чи прототипів до масового виробництва.