

<https://doi.org/10.15407/plit2024.02.019>

УДК 621.74.02, 621.74.041

В.С. Дорошенко, д-р техн. наук., пров. наук. співроб.;

e-mail: doro55v@gmail.com; ORCID 0000-0002-0070-5663

П.Б. Калюжний, канд. техн. наук., заст. директора;

e-mail: kpb.ptima@gmail.com; ORCID 0000-0002-1111-4826

М.М. Дьяченко, аспірант; e-mail: maximail@ukr.net;

ORCID 0009-0002-4957-9407

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

ЛИТТЯ ЗА ГАЗОПРОНИКНИМИ ПОЛІМЕРНИМИ МОДЕЛЯМИ, ЩО ГАЗИФІКУЮТЬСЯ З ВІДКАЧУВАННЯМ ПО ВЕНТКАНАЛАХ ГАЗІВ ІЗ РОБОЧОЇ ПОРОЖНИНИ ФОРМИ

У технічній літературі відзначається переважний розвиток спеціальних способів лиття, зокрема лиття під тиском та з вакуумуванням ливарної форми. Цифровізація та автоматизація також сприймаються сьогодні як обов'язкова умова організації виробничих процесів. Це в першу чергу стосується ливарного виробництва України для створення потужного потенціалу, що сприятиме відновленню країни. Проведено огляд розроблених під керівництвом проф. О.Й. Шинського низки способів лиття металу за моделями, що газифікуються (ЛГМ) в піщаних формах із використанням регульованого газового тиску чи розрідження. Описані способи об'єднує застосування разових моделей із вентиляційними каналами для створення направленої газового режиму в моделі та формі й регульованого впливу газового тиску на заливання форми металом. Ці способи дозволяють як регулювати заповнення форми металом, впливаючи на якість виливків, так і виготовляти металовироби складної конфігурації з друкуванням їх моделей в автоматичному режимі за цифровими даними, що відповідає зростаючому тренду цифровізації та автоматизації ливарних процесів. Сумарну вигоду буде отримано як від доволі швидкісного 3D-друку ливарної моделі, так і від короткотривалих процесів формування та вибивання виливків завдяки використанню ливарних форм із сухого піску. При цьому цифрова трансформація ЛГМ поєднується з ефективністю оборотного застосування формувальних матеріалів без зміни чинних стандартів контролю металопродукції, що нерідко властиво способам 3D-друку металоконструкцій. Адаптація виробництва до адитивних технологій дозволяє за допомогою інтернет-мережі взаємодіяти з покупцем товару, який проєктується за його індивідуальним цифровим кресленням. Крім того, поєднання нових цифрових процесів із традиційними виробничими скорочує часовий розрив від створення прототипів, пілотних зразків продукції до масового виробництва.

Ключові слова: ливарне виробництво, лиття під тиском, 3D-друк, разова ливарна модель, газифікація моделі, лиття за моделями, що газифікуються.

У ливарних цехах на процеси виготовлення піщаної форми за часткою собівартості продукції щонайменше половина витрат традиційно припадає на одержання виливків, а екологічні забруднення, пов'язані з матеріалами й технологією форми, можуть сягати 80 % від забруднень ливарного цеху. Водночас способи лиття у вакуумовані форми із сухого піску (включаючи способи лиття за разовими моделями), що зміцнюється не за рахунок зв'язувальних компонентів, а за допомогою перепаду газового тиску, дозволяють знизити шкідливі викиди в атмосферу цеху, а також багаторазовим зворотом піску на повторне виготовлення форм із відходами до 5 % за цикл дають суттєву економію формувальних матеріалів. Відкачування газів із ливарної форми вакуумним насосом у складі цехової системи та їх очищення покращує екологічну безпеку в ливарних цехах і навколо них.

Разом із розумінням ролі продуктивності виробничих процесів як основного показника їх ефективності в технічній літературі відзначається переважний розвиток спеціальних способів лиття, зокрема лиття під тиском (ЛПТ), а також із вакуумуванням ливарної форми при низькій динаміці патентування процесів сирого формування, що вказує на зниження можливості її вдосконалення [1]. Водночас піщане формування, на відміну від лиття в металеві форми, дає гнучкість виробничому процесу за рахунок варіювання номенклатури ливарної продукції та здешевлення витрат на дрібні партії виливків із швидким переходом від однієї партії до іншої.

Також 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 [2]. Зокрема, завдяки цифровізації та автоматизації ливарного виробництва в Україні є можливість створення потужного потенціалу, що сприятиме відновленню країни.

Метою статті є огляд розроблених відділом фізико-хімії ливарних процесів під керівництвом проф. О.Й. Шинського низки способів лиття металу за моделями, що газифікуються (ЛГМ) в піщаних формах із використанням регульованого газового тиску чи розрідження. Описані способи поєднує застосування разових моделей із вентиляційними каналами для створення спрямованого газового режиму в моделі й формі та регульованого впливу газового тиску на заливання форми металом.

Створений у кількох варіантах спосіб лиття [3] (рис. 1) ґрунтується на застосуванні газопроникних полімерних моделей. У першому його варіанті (рис. 1, а) ЛГМ поєднано з ЛПТ, при якому в піщану форму метал заливається під тиском і своїм теплом газифікує модель, тиск газів від якої, у свою чергу, зміцнює форму із сухого піску. Принцип дії способу полягає в тому, що завдяки газовому тиску на розплавлений метал 1 у тиглі метал по металопроводу 2 подається знизу у форму 3 із сухого піску та разовою моделлю 4 з пінополістиролу (ППС). Газопроникність моделі досягається виконанням вентиляційного каналу 5 методом свердління або пропалювання моделі нагрітим прутком чи паяльником. Варіанти виконання таких каналів у моделі також описано в патентах України 80656, 85515, 91224, 154450; ці описи доступні на сайті «Укрпатент» (ДП УІІВ) base.uipv.org/searchINV/search.php?action=search. Канал 5 служить для виходу газів уздовж руху металу під час заповнення ним форми знизу вгору.

Таким чином, як тільки розплав металу підводиться знизу до моделі, по каналу 5 газу вільно виходять крізь короткий трубчастий випор у верхній точці моделі. Канал 5 у цій точці через вогнетривкий фільтр 6 (піщану чи керамічну пористу прокладку) сполучений трубою з датчиком тиску зворотного зв'язку 8. Для сполучення з атмосферою пісок форми 3 має сітчасті (чи жалюзійні) ділянки 7 на стінках контейнерної опоки. Опоку після заповнення піском та його ущільнення накривають зверху кришкою.

Спосіб включає автоматичне регулювання газового тиску за таким принципом: первинний прилад-датчик тиску зворотного зв'язку 8 вимірює тиск і певним електричним сигналом подає на вхід регулятора 9. Регулятор 9 порівнює сигнал датчика із заданим та визначає знак і величину розбіжності. Знак показує, у який бік необхідно перемістити регулюючий орган 10, а величина — тривалість переміщення. Із регулятора інформація подається на перетворювач інтерфейсів, із якого потім надходить на ЕОМ.

Тиск, який забезпечує ємність 11 (сполучений із компресором акумулятор газового тиску), після корекції регулятором 9 контролюють датчиком 12, що пов'язаний з обладнанням для запису. В описі [3] наведено перелік приладів та обладнання системи регулювання газового тиску відповідно до заданого режиму роботи.

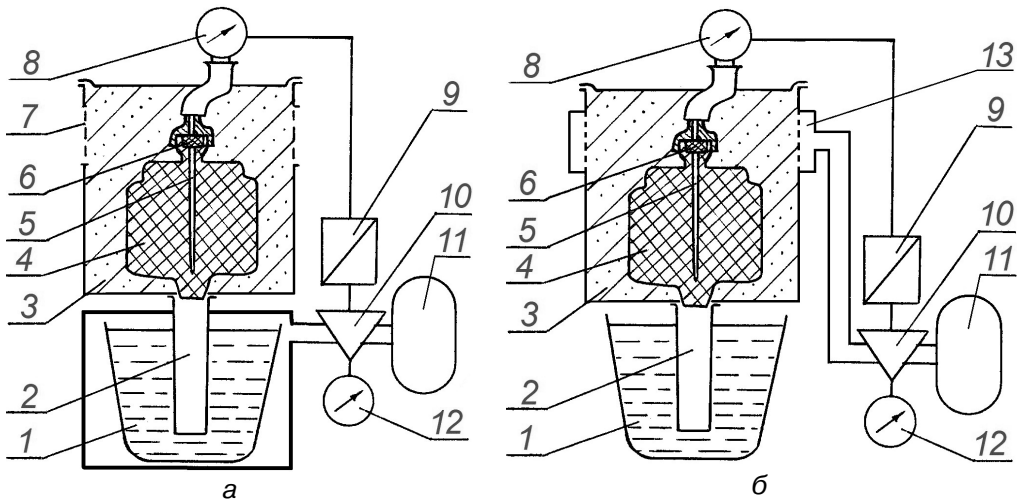


Рис. 1. Спосіб ЛГМ із використанням перепаду тиску: а — ЛПТ; б — із вакуумуванням форми; 1 — розплав металу, 2 — металопровід, 3 — форма, 4 — пінопластова модель, 5 — канал, 6 — фільтр, 7 — сітчастий фільтр, 8 — датчик тиску зворотного зв'язку, 9 — регулятор, 10 — регулюючий орган, 11 — ємність — джерело газового тиску, 12 — датчик тиску, 13 — вакуумна камера з фільтром

Необхідна якість виливка досягається при знаходженні піску в непорушному стані навколо моделі в процесі заміщення її металом. При заливанні металу модель як опору для піску замінює утримуючий пісок перепад газового тиску (від газифікації моделі) таким чином, що в ливарній порожнині форми, яка утворюється в процесі термодеструкції моделі, тиск газу вищий, ніж у піщаному середовищі форми (товщі піску). Пінопластова модель служить джерелом газу, а бар'єром, що затримує вихід із форми газів, служить протипригарне покриття (шар вогнетривкої фарби на моделі) разом із продуктами деструкції моделі, які вбираються в поверхневий піщаний шар, там конденсуються і знижують його газопроникність закупорюванням щілин між піщинками форми. Також перепад (неперервна просторова зміна, або градієнт) тиску газів у стінках форми (залежно від відстані до вакуум-фільтра) створює пісок форми завдяки опору їх фільтрації.

Новизна способу лиття полягає в тому, що в порожнину форми на модель, що газифікується, рідкий метал подається під тиском вище атмосферного, а для зміцнення форми використовується сумарний тиск рідини металу й газів від газифікації моделі. Регулювання цього сумарного тиску в порожнині форми та підтримання його в необхідних межах є передумовою отримання якісного виливка без обсіпання піску (у разі малого перепаду тиску) або утворення механічного пригару на виливку (у разі високого перепаду тиску з просоченням піску металом). Зазначимо, що описаний спосіб є продовженням циклу розробок учених ФТІМС НАН України способів ЛПТ у піщані форми [4, 5].

У першому варіанті цього способу регулюванням перепадом тиску на метал забезпечують міцність піску форми навіть без застосування вакуумування форми, що допустимо для цехів без вакуумного обладнання в комплекті з газоочисним. Цей перепад можливо підтримувати в інтервалі 10...80 кПа понад атмосферний за відсутності вакуумування. Мінімальне значення цього інтервалу для піщаної форми із шаром піску товщі (вище) 60 см обґрунтовано тим розрахунком, що при атмосфер-

ному тиску $1000 \text{ г/см}^2 = 98 \text{ кПа}$ (10 м вод. стовпа) шар піску з питомою вагою $1,7 \text{ г/см}^3$ висотою 60 см чинитиме тиск на горизонтальну поверхню ($60 \cdot 1,7 = 102 \text{ г/см}^2$), приблизно рівний 10 кПа. Якщо з боку порожнини форми газовий тиск буде меншим, то форма із шаром піску товще (вище) 60 см може обвалитися. Форми менших розмірів зазвичай у техніці не застосовують.

Максимальне значення цього інтервалу вибрано з практики застосування типових відпрацьованих протипригарних покриттів при литті у вакуумовані піщані форми, які вакуумують водокільцевим насосом типу ВВН, здатним створити не більше 80 кПа нижче атмосферного (за вакууметром, що відповідає залишковому тиску $\approx 20 \text{ кПа}$). Оптимальним розрідженням для вакуумованих форм вважається 53...56 кПа [6], перевищення якого створює умови для механічного пригару на виливках (зокрема при литті чавуну), особливо на їх увігнутих місцях, які виконуються піщаними виступами типу «болванів», а зменшення може сприяти деформації виступів у порожнині форми.

Таким чином, через вентканал 5 (рис. 1, а) уздовж моделі одержуваного виливка на весь період її заміщення металом забезпечують необхідну різницю тиску шляхом вимірювання датчиком 8 і автоматичним управлінням регулятором 10 перепаду тиску на метал. Для отримання серійних виливків достатньо в процесі проведення 3–5 заливок металу визначити різницю газового тиску та записати мікропроцесорним регулятором оптимальний перепад тиску на метал, а для подальших заливок достатньо повторювати режим за цими записами без потреби визначення різниці газового тиску, регулятор лише буде повторювати записаний режим.

Розглянутий варіант способу ЛПТ обходиться без застосування вакуумних насосів та піщаних форм зі зв'язувальним компонентом. Але оскільки при цьому продукти газифікації моделі можуть потрапляти в цех і погіршувати умови праці персоналу, то в другому різновиді способу (рис. 1, б) замість газового тиску на метал застосовано вакуумування піску, завдяки якому на пісок форми створюють такий перепад газового тиску, величини якого достатньо як для утримання піску форми в статичі, так і для всмоктування розплавленого металу, що заповнює форму. Для вакуумування металевий контейнер форми з піском і моделлю замість сітчастого фільтра 7 обладнують типовими вакуумними фільтрами, наприклад, із вакуумною камерою 13 на стінках контейнера, яку підключають до ємності 11, що в цьому випадку є акумулятором пониженого газового тиску (сполученого з вакуум-насосом). При цьому тигель із металом перебуває під атмосферним тиском. Аналогічно ЛПТ шляхом контролю різниці тиску датчиком 8 у зазначених межах, зокрема для легких сплавів, приладами 9 і 10 досягають перепаду тиску на метал шляхом використання вакуумування піску форми.

Якщо у вакуумованому піску форми створити розрідження (із залишковим тиском повітря 20 кПа), а на ущільнення піску виділити частину перепаду тиску 20 кПа, формі сполучити ливником із поверхнею металу, на яку діє атмосферний тиск 98 кПа, то тим самим для всмоктування металу залишиться перепад тиску (розрідження) $98 - 20 - 20 = 58 \text{ (кПа)}$. Для рідкого алюмінію густиною 2380 кг/м^3 таке розрідження достатнє, щоб підняти стовп металу по ливнику (металопроводу) на висоту $(58 \cdot 10) / (2,38 \cdot 98) = 2,49 \text{ (м)}$. Цей розрахунок свідчить, що залишковий тиск до 20 кПа при вакумуванні піску достатній для ущільнення піску та створення вакуумного всмоктування алюмінію на висоту до 2,49 м від його рівня в тиглі.

Далі розглянемо спосіб із застосуванням 3D-друку ливарних моделей для ЛГМ і проєктування ливарної технології за допомогою комп'ютерних систем, що підвищує можливість змінювати як конфігурацію ливарної продукції, так і конструкцію моделей тільки за рахунок внесення змін у цифрову модель продукції без переформування виробничого базису. Такі елементи цифровізації ЛГМ-процесу підвищують його гнучкість при випуску дрібносерійної, разової (зокрема кастомізованої) металопродукції з метою швидкого реагування на потреби ринку, а також в плані наближення до технологій, що не шкодять довкіллю.

Застосування комп'ютерної системи при підготовці до 3D-друку ливарної моделі полягає в тому, що в цифровому кресленні металевої деталі на моніторі комп'ютера відображають ливарну технологію, створюють креслення ливарної моделі, а на ньому, згідно з розробленим нами способом, додатково креслять вентиляційні газовивідні канали в стінках ливарної моделі, отримуючи з ними друковану модель. За цією моделлю виконують форму із сипкого піску в процесі застосовування традиційних операцій ЛГМ-процесу.

Впровадження друкованих моделей значно скорочує тривалість підготовки виробництва нової продукції, бо воно обходиться без оснастки (прес-форм) для виготовлення ливарних моделей, яка нерідко є складною та дорогою за вартістю. Це дозволяє розширити геометрію виливків, друкувати разові моделі навіть неможливі раніше конфігурації з високою чистотою поверхні, змінюючи дизайн металовиробу лише за рахунок внесення змін у його цифрову модель в комп'ютерній системі без будь-якої зміни обладнання в ливарному цеху. Автоматизований 3D-друк із цифрових даних ливарних моделей (навіть разової конструкції за індивідуальним замовленням або складної тонкостінної комплекції) і по них — металевих виливків усе частіше стає предметом досліджень провідних ливарних і машинобудівних компаній світу та 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 ППС) друкованої моделі може призвести як до викидів металу з ливникової системи, так і до гальмування заповнення ним форми з утворенням браку виливків по недоливах. А також сучасний друкований матеріал моделей дає більший вуглецевий (коксівий 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 вигідні складові: 1) виконання вентканалів у конструкції моделі; 2) при комп'ютерному проектуванні внесення цих каналів у цифрове креслення моделі; 3) підведення до вентканалів газового розрідження з піщаного середовища ливарної форми за принципом «чим більше газів, тим інтенсивніше їх відкачування». Виведення газів із моделі протягом всього періоду її газифікації при течії металу вздовж таких каналів розширить номенклатуру виробництва методом ЛГМ, у тому числі тонкостінних виливків, а також знизить перешкоди застосування друкованих моделей, пов'язані з ростом виділення продуктів газифікації.

На нинішньому початковому етапі застосування друкованих ливарних моделей для ЛГМ цифрове 3D-креслення металовиробу створює конструктор у комп'ютерній системі CAD і передає виробникові для друку, або виробник сам може створити таке 3D-креслення (наприклад, скануванням готового виробу-прототипу). Потім на 3D-креслення (3D-модель) цього виробу наносять ливарну технологію з урахування усадки металу відповідно до розмірів ливарної моделі, марки металу, припусків на механічну обробку тощо, конвертують файл у формат STL для 3D-друку і друкують цю ливарну модель. Оскільки 3D-друк лише починає застосовуватись для ЛГМ, то інформації про друк у ливарній моделі вентиляційних каналів уздовж її стінок за напрямком течії металу не виявлено.

Після 3D-друку вентилязованої ливарної моделі за нею виготовляється ливарна форма із сухого піску, яка заливається розплавленим металом при її вакуумуванні та газифікації теплом металу друкованої моделі з відведенням газових продуктів газифікації крізь канали. Для виходу газів у пори піску форми ці канали продовжують полімерними трубками, вихідні кінці яких закривають газопроникним вентами, що не пропускають пісок. Крім того, у разі застосування вставок із ППС у комплекті з 3D-друкованою моделлю канали для виводу газів можуть друкувати у вигляді борозенок, що утворюють канали по стику із цими вставками й друкованою частиною моделі. Також полімерні трубки застосовували зі стінками достатньої міцності (наприклад, поліпропіленові) для запобігання їх деформації від дії на них вакууму в піску форми

або з цією ж метою вставляли в них спіраль із металевго дроту або газопроникні пробки з піщаної суміші, які служили вентами.

Проектування друкованої моделі для розробленого нами способу [7] показано на рис. 2 на прикладі виготовлення моделі зубчастого валка 1 для соломорізки. Вирізати на 3D-фрезері цільну модель із блочного ППС такої складної геометричної форми практично неможливо, тому її вирізують і склеюють із частин, як описано в роботі [8] для такого типу валка. Але 3D-друком можна виготовити цільною зовнішню частину моделі. У нашому прикладі для зменшення маси моделі її внутрішню частину заповнили циліндричним патрубком 3 із ППС густиною 18 кг/м^3 [7]. Варіант моделі ливникової системи 2 із ППС схематично показано поряд із валком.

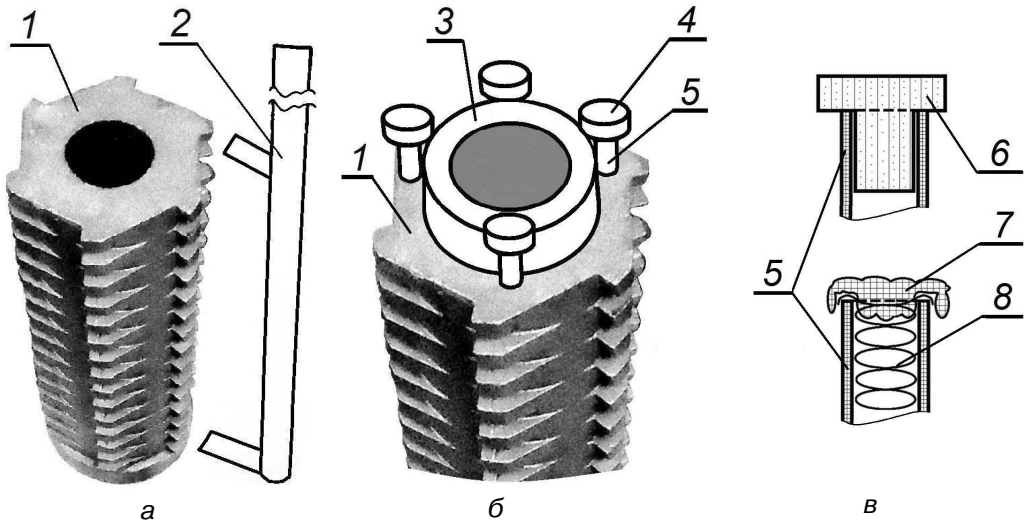


Рис. 2. Валок і проект конструкції модельного комплексу: а — валок із ливниковою системою; б — верхня частина моделі валка; в — венти в повздовжньому розрізі; 1 — валок; 2 — модель ливникової системи; 3 — патрубок із ППС; 4 — вента; 5 — трубка; 6 — піщана пробка у функції вента; 7 — вента з вати; 8 — спіраль із дроту

На рис. 2, б показано верхню частину моделі валка 1 з частиною патрубку 3 із ППС. Робочою частиною валка є зовнішня, а внутрішній центральний канал служить для полегшення маси виливка і при виготовленні ливарної форми заповнюється піском. На внутрішній стороні друкованої частини моделі на стику із зовнішньої поверхнею патрубку 3 вздовж його осі при друкуванні виконано борозенки (не показано), що при стику із зовнішньої поверхнею патрубку 3 утворюють повздовжні вентканали, які сполучено з чотирма полімерними трубками 5 з вентами 4. Приклади виконання вент показано на рис. 2, в. Виготовлена з піщаної суміші вента 6 служить пробкою, а вента 7 виконана з вати, що опирається на спіраль 8 із металевго дроту. В останньому варіанті замість трубки можливе утворення патрубку обертанням плівки «скотч» навколо спіралі 8. Венту-пробку 6 виготовили з піщано-рідкоскляної наливної суміші з високою газопроникністю, а вента 7 з вати утримується стінками трубки та спіраллю, яка потрібна в разі застосування м'якої трубки. Аналогічно часто армуються гнучкі трубопроводи побутових пылесосів. Друкування вентканалів є простішим у вигляді прямолінійних борозенок, тому застосовано такий варіант, у якому частину поверхні вентканалу утворено пінопластовим патрубком 3, вставленим у друковану формотворну частину моделі 1.

Для випробування способу моделі друкували методом пошарового наплавлення (FDM) з полілактиду (PLA) — біорозкладного термопластичного поліефіру, який є одним із широко використовуваних і недорогих за вартістю термопластиків для друку. PLA має густину 1240 кг/м^3 , температуру плавлення $150\text{--}160^\circ\text{C}$, температуру

кипіння 227 °С. 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 із ливниковою системою 2, вставкою 3 і трубками 5 покрили протипригарною фарбою, не фарбуючи трубки та венти. При формуванні в контейнері моделі сухим піском із вібраційним ущільненням контейнер зверху загерметизували синтетичною плівкою, вивели крізь неї верхню частину моделі ливникової системи і поставили на неї керамічну воронку - лійку для спрямування струменю металу.

Заливання розплаву високоміцного чавуну у форму виконували при її вакуумуванні, під'єднавши до трубопроводу цехової вакуумної системи, у якій підтримували залишковий тиск повітря на рівні 40–50 кПа. При підведенні розплавленого металу по ливниковій системі головним чином знизу до моделі він викликав газифікацію моделі при русі знизу вгору; гази від газифікації моделі по вентканалах відкачувались крізь трубки 5 і венти 4, далі в пісок форми і потрапляли 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 вищий, ніж на поверхні «модель-форма», що забезпечувало стабільність стінки форми в момент контактування її з металом. Після заливання металом форми охолодження в ній вилитка протягом кількох годин і видалення його з форми отримали виливок високої якості. Верхній надлив, утворений виступом патрубка 3 з металевими стовпчиками на місцях 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, вентканали зменшують масу моделі та дозволяють інтенсифікувати відкачування газів завдяки вакууму форми. Протягом всього процесу заливання форми завдяки вакууму в піску форми відбувається примусове видалення (відсмоктування) газів у пісок форми крізь ці канали й трубки з вентами. Водночас ці канали завдяки проникненню крізь них низького газового тиску з піску форми спрямовують потоки металу, створюючи ефект вакуумного всмоктування, що поліпшує заповнення форми та запобігає появі таких дефектів, як недоливи, особливо в тонкостінних виливках.

Таким чином, застосування принципу «чим більше газів від газифікації моделі, тим більше потрібно застосувати засобів їх видалення з посиленням впливу вакууму форми на відкачування як газів, так і рідкого металу, що рухається вслід за газами, поліпшуючи умови заміщення ним моделі», сприяє залученню 3D-друку в ЛГМ-процес, використовуючи його можливості автоматизованого виготовлення вентильованих моделей або моделей із направленою пористістю. Моделі з каналами направленої газовідводу під впливом вакууму за своєю функцією в ідеалі можна розглядати як аналог вакуумпроводу для відкачування продуктів від власної газифікації. Варіанти заповнення пористого тіла (серцевини) друкованих моделей, як показано на рис. 3 [9], відомі своєю різноманітністю. Залишилось направити їх каналами пор з орієнтацією по ходу виходу газів і заповнення форми металом. Відкачування газів також дозволить разом із ними вивести дрібні частинки сажі чи так званого коксового залишку, що запобігатиме їх негативному впливу на деякі сплави, які можуть із ними реагувати. Описані вентильовані моделі також цілком вписуються в процеси, зображені на рис. 1.

Розширення лиття за друкованими моделями сприятиме виробництву широкої

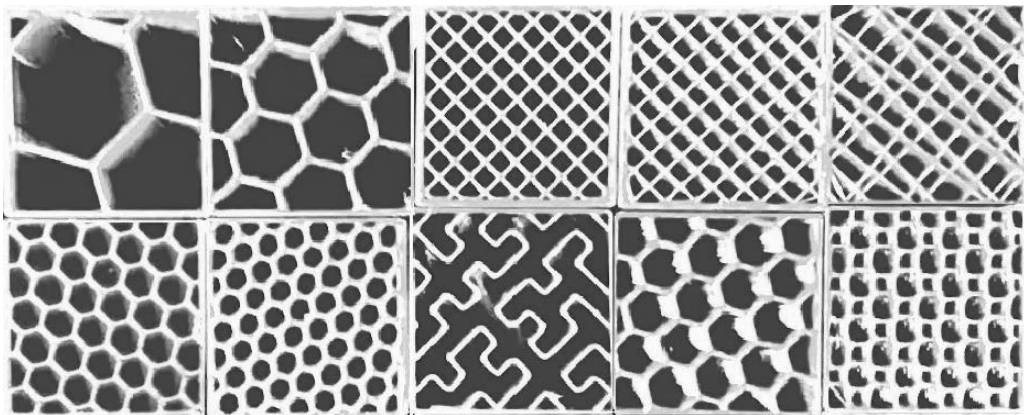


Рис. 3. Деякі типові приклади заповнення друківаних виробів [9]

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-технологій розширить, зокрема по інтернет-мережі, 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 газопроникними полімерними моделями, що газифікуються з відкачуванням по вентканалах газів із робочої порожнини форми, має низку потенційних, поки що нереалізованих можливостей для автоматизації та цифровізації виробництва металопродукції. Розглянуті способи такого виробництва дозволяють 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 за цифровими кресленнями, що відповідає зростаючому тренду цифровізації й автоматизації ливарних процесів. Це дозволяє отримати сумарну вигоду як від оперативного 3D-друку ливарної моделі, так і від нетривалих процесів формування й вибивання виливків із сухого піску ливарних форм при ЛГМ. При цьому ресурсоефективність оборотного застосування формувальних матеріалів без зв'язувальних реактивів поєднується із цифровою трансформацією ЛГМ без зміни чинних стандартів контролю металопродукції, що часто 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 із новими цифровими суттєво скорочує тривалість переходу від створення пілотних зразків продукції чи прототипів до масового виробництва.

Список літератури

1. Минаев А.А. Разработка научных представлений о закономерностях генезиса технологии литейного производства в XX веке и перспективы ее развития на ближайший период: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: (05.16.04). Москва: МАМИ, 2007. 41 с.
2. Nina Dybdal Rasmussen. A Digital Revolution is Transforming Foundries Worldwide. Foundry Management & Technology. Jan./Feb. 2024. P. 27-28.
3. Патент 93723 Україна, МПК В22D 18/06, В22С 9/04. Спосіб лиття металу за одноразовими моделями в піщану форму під дією перепаду тиску. О.Й. Шинський, В.С. Дорошенко. Опубл. 10.03.2011, Бюл. № 5.

4. Шинский О.И. Роторно-конвейерный комплекс получения точных отливок под регулируемым давлением по газифицируемым моделям (ГАМОДАР-процесс). URL: <http://www.ptima.kiev.ua/work/te/rus/te-r40.pdf>.
5. Караник Ю.А. Способ получения отливок со свойствами на уровне поковок и проката. *Литейное производство*. 2006. № 10. С. 25–28.
6. Минаев А.А., Ноткин Е.Б., Сазонов В.А. Вакуумная формовка. Москва: Машиностроение. 1984. 216 с.
7. Заявка u202305216 Україна, МПК8 B22 C7/02, B22C 9/04. Спосіб лиття металу за 3D-друкованими моделями, що газифікуються у вакуумованих формах з сипкого піску. П.Б. Калюжний, І.А. Шалевська, О.В. Нейма та ін. Заявл. 3.11.2023.
8. Marshall Miller. Why Lost Foam? Modern Casting. 2020. No. 8. P. 41–42.
9. O'Connell. 3D Printing Infill: The Basics — Simply Explained. 24.02.2022. URL: <https://all3dp.com/2/infill-3d-printing-what-it-means-and-how-to-use-it/>.

Надійшла 16.02.2024

References

1. Minaev A.A. Development of scientific ideas about the laws of the genesis of foundry technology in the twentieth century and prospects for its development in the near future: abstract of thesis. dis. ... dr. tech. Sciences: (05.16.04). Moskva: MAMI, 2007. 41 p. [in Russian].
2. Nina Dybdal Rasmussen. A Digital Revolution is Transforming Foundries Worldwide. *Foundry Management & Technology*. Jan./Feb. 2024. P. 27–28.
3. Patent 93723 of Ukraine, IPC B22D 18/06, B22C 9/04. The method of casting metal according to disposable models in a sand mold under the effect of a pressure drop. O.Y. Shyns'kyi, V.S. Doroshenko Publ. 10.03.2011, Bul. № 5 [in Ukrainian].
4. Shinskij O.J. Rotary-conveyor complex for obtaining accurate castings under controlled pressure by gasifying patterns (GAMODAR process). URL: <http://www.ptima.kiev.ua/work/te/rus/te-r40.pdf> [in Russian].
5. Karanik, Yu.A. Reduction of metal and energy consumption in the production of castings of machine parts and mechanisms. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii*. № 2. 2008. P. 11–16 [in Russian].
6. Minaev A.A., Notkin E.B., Sazonov V.A. Vacuum molding. Moskva: Mashinostroenie. 1984. 216 p. [in Russian].
7. Zaiavka u202305216 of Ukraine, IPC B22 C7/02, B22C 9/04. The method of casting metal according to 3D-printed patterns, which are gasified in vacuum molds made of loose sand. P.B. Kalyuzhnyi, I.A. Shalevs'ka, O.V. Neyma ta in. Zaiavl. 3.11.2023 [in Ukrainian].
8. Marshall Miller. Why Lost Foam? Modern Casting. 2020. No. 8. P. 41–42.
9. J. O'Connell. 3D Printing Infill: The Basics – Simply Explained. 24.02.2022. URL: <https://all3dp.com/2/infill-3d-printing-what-it-means-and-how-to-use-it/>.

Received 16.02.2024

V.S. Doroshenko, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Leading Researcher; e-mail: doro55v@gmail.com; ORCID 0000-0002-0070-5663

P.B. Kaliuzhnyi, PhD (Engin.), Deputy Director;
e-mail: kpb.ptima@gmail.com; ORCID 0000-0002-1111-4826.

M.M. Dyachenko, graduate student; e-mail: maximail@ukr.net;
ORCID 0009-0002-4957-9407

Physico-Techological Institute of Metals and Alloys of NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

CASTING ACCORDING TO GAS-PERMEABLE POLYMER MODELS THAT ARE GASIFIED WITH PUMPING OF GASES FROM THE WORKING CAVITY OF THE MOLD THROUGH VENT CHANNELS

The technical information notes the predominant development of special methods of casting, in particular, casting under pressure, as well as with vacuum casting. Also today, digitization and automation are perceived as a necessary condition for the organization of production processes. In particular, this concerns the foundry industry of Ukraine to create a powerful potential that will contribute to the recovery of the country. A review of the work developed by the department of Prof. O. Y. Shinsky series of methods of casting metal according to patterns that are gasified (Lost Foam casting, LFC) in sand molds using regulated gas pressure or rarefaction. The described methods combine the use of single-use patterns with ventilation channels to create a directed gas regime in the pattern and form and the adjustable effect of gas pressure on filling the form with metal. These methods allow both to regulate the filling of the mold with metal, affecting the quality of the castings, and to manufacture metal products of complex configuration with printing of their patterns in automatic mode based on digital data, which corresponds to the growing trend of digitization and automation of foundry processes. The total benefit is obtained from both the fairly fast 3D printing of the foundry pattern and the short-term processes of forming and punching out the castings thanks to the use of dry sand casting molds. At the same time, the digital transformation of LFC is combined with the efficiency of reversible application of molding materials without changing the current standards of control of metal products, which is often characteristic of methods of 3D printing of metal structures. Adaptation of production to additive technologies allows interaction with the buyer of the product, which is designed according to his individual digital drawing, using the Internet. Also, this combination of new digital processes with traditional production processes shortens the time gap from the creation of prototypes, pilot samples of products to mass production.

Keywords: foundry production, injection molding, 3D printing, one-time foundry pattern, pattern gasification, Lost Foam casting.