

Дорошенко В.С.

(ФТІМС НАН України, Київ)

**ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДУ ЛИТТЯ З ВАКУУМУВАННЯМ ПОЛІМЕРНОЇ  
МОДЕЛІ, ЩО ГАЗИФІКУЄТЬСЯ, У ПІЩАНІЙ ФОРМІ**

E-mail: doro55v@gmail.com



**АНОТАЦІЯ.** У статті розглянуто шляхи вдосконалення традиційного методу лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ-процес). Проаналізовано основні недоліки класичної технології, зокрема підвищений тиск газів у порожнині форми, проникнення вуглецю в метал та необхідність значного перегріву розплаву. Автором запропоновано та досліджено метод вакуумування безпосередньо внутрішньої порожнини моделі через систему вентканалів. Такий підхід дозволяє інтенсифікувати видалення продуктів газифікації, знизити динамічний тиск газів на фронті металу та покращити заповнюваність форми. Отримані результати підтверджують можливість підвищення якості виливків, зменшення ризику виникнення дефектів типу «недолив» та розширення технологічних можливостей методу для виготовлення тонкостінних деталей.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** лиття за моделями, що газифікуються, вакуумування форми, полімерна модель, продукти газифікації, піщана форма, оптимізація лиття.

Традиційний метод лиття металу за моделями, що газифікуються (ЛГМ-процес), передбачає відведення продуктів газифікації полімерної моделі з робочої порожнини вакуумованої форми крізь пори протипригарної фарби та піску ливарної контейнерної форми. Однак, попри безперечні переваги цього методу як економного та одного з недорогих за собівартістю литва процесу, його поширення ускладнює наявність підвищеного тиску газів у порожнині форми під час заливання металу, а також наявність у цих газах сажистих компонентів (вуглецю), які можуть проникати в литий метал. Крім того, газифікація моделі є ендотермічним процесом, що потребує перегрівання металу, який заливається, порівняно з литтям у традиційні порожнисті форми. Тривалість заливання

(формозаповнення) дещо подовжується, а порушення оптимального функціонування системи «метал-модель-форма» може призводити до браку литва, зокрема недоливів та спаїв.

В попередніх роботах ФТІМС НАН України досліджуються методи «підключення» вакууму з піщаного середовища форми до її порожнини в процесі заміщення моделі металом [1, 2]. За виразом В. С. Серебро, зазор між розплавленим металом і моделлю, що газифікується, є рухомим джерелом газовиділення [3]. Саме це джерело запропоновано сполучити з вакуумованим піщаним середовищем форми за допомогою вентиляційних каналів (вентканалів) у моделі. Це дасть змогу не лише зменшити тиск газів, а й забезпечити вакуумування металу під час його заливання в форму [4].

Якщо традиційна модель з пінополістиролу (ППС) зазвичай негазопроникна, то в ній виконують вентканалі, наприклад, механічними чи термомеханічними методами шляхом попереднього закладання дротяної спіралі у стінку моделі в процесі її виготовлення в прес-формі з подальшим видаленням цієї спіралі з моделі [5], або пропаленням такого каналу вздовж поверхні стінки моделі знизу вгору в положенні моделі в ливарній формі [6].

Перехід від традиційних методів відведення газу прив технології ЛГМ з протитиском (вище атмосферного тиску) цього газу на метал в порожнині форми до методу помірною вакуумного впливу (нижче атмосферного тиску) на газ над рівнем металу, що заливається в форму та газифікує модель, і на сам метал схематично ілюструється на рис. 1.

Вентканал 9 (рис. 1) виводиться на верхню точку моделі та продовжується трубчастим випором. Такі трубчасті випори було надруковано на 3D-принтері BambuLab (рис. 2). Товщина стінки їх трубки – 0,1 мм, діаметр – 7 мм. Тонший кінець трубчастого випора вставляли в канал 9 на моделі, а в отвір з конусним розширенням до 25 мм (по діаметру) вставляли венту у вигляді кришки із щілинами чи порами, які пропускали газ, але не пропускали пісок [3].

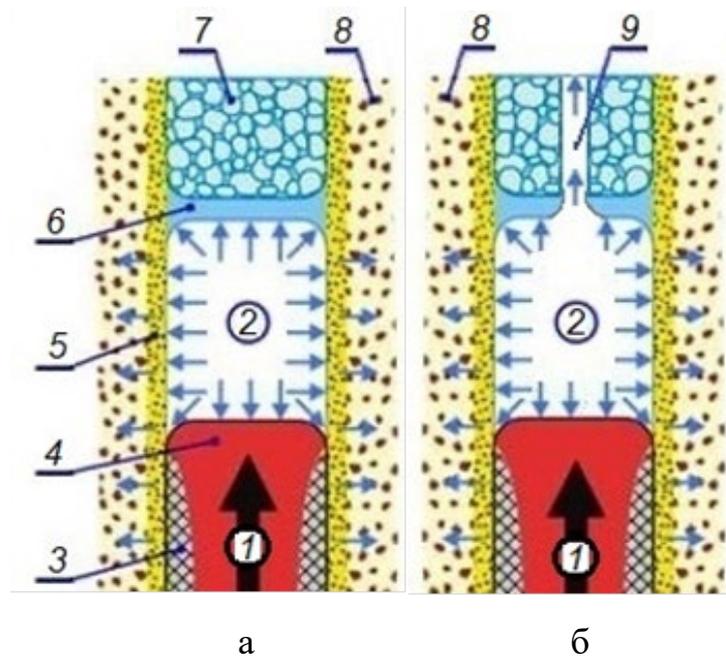


Рис. 1. Схема заповнення розплавом металу форми в процесі газифікації моделі з ППС за традиційним способом (а) та з вентиляцією (б): 1 – напрям заповнення форми металом; 2 – тиск газу; 3 – плівка (кірка) металу; 4 – розплав металу; 5 – протипригарна фарба; 6 – розплав ППС; 7 – ППС; 8 – сухий вакуумований пісок; 9 – газовідвідний (вентиляційний) канал

Розширенням верхньої частини вертикального трубчастого випора досягалося те, що сумарна площа пор піску в процесі контакту з ним наближалась до прохідної площі отвору тонкої частини випора.

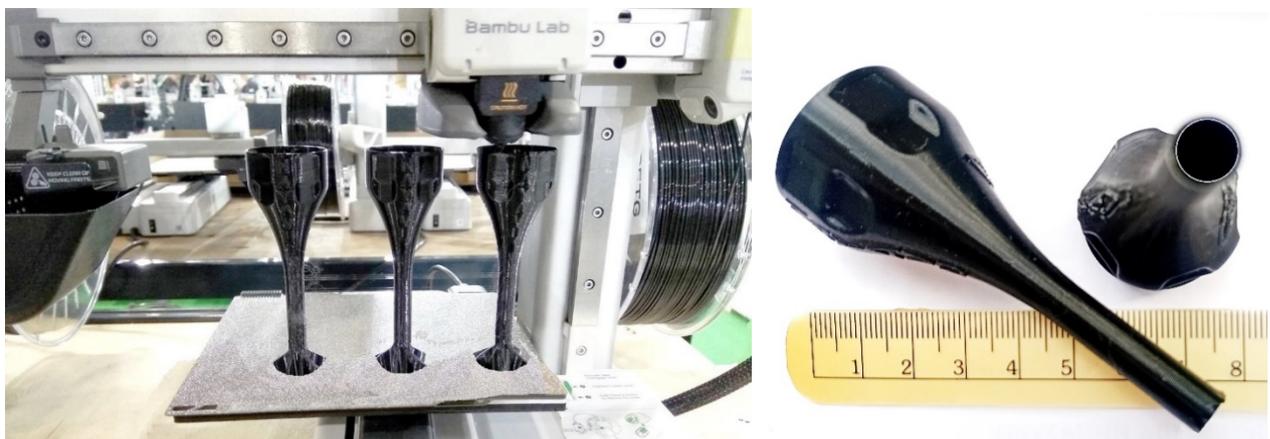


Рис. 2. 3D-друк трьох випорів на принтері з чорного філаменту PLA, а також трубчастий випор з конусним розширенням у двох видах

Для друкованих моделей з більшою газотвірністю, ніж традиційні моделі з ППС, запропоновано їх цифрове проектування на комп'ютері відразу з газовивідними каналами, які виконуються в процесі друкування [2]. В іншому варіанті такі моделі друкуються з відкритими порами, що забезпечує спрямовану (транзитну) пористість стінок моделей знизу вгору. Це дає змогу відводити газ крізь такі пори і трубчастий випор в пори піску вакуумованої форми.

Таким чином, проблему високого тиску газів у процесі газифікації моделі вирішено шляхом створення вентканалів у конструкції ливарної моделі, які проектуються на її цифровому кресленні. Вони пролягають у напрямку заміщення моделі розплавом металу та продовжуються полімерними трубками (випорами) у верхніх точках моделі для виходу газів у пісок форми крізь газопроникні вентили на вихідних кінцях цих трубок.

На відміну від традиційних методів створення вентканалів механічним способом чи пропалюванням, автоматизація виготовлення таких каналів у ході 3D-друку значною мірою знижує трудомісткість процесу, незалежно від складності конфігурації ливарних моделей. При цьому вентканали можуть мати численні згини вздовж тонких стінок моделей, що практично неможливо здійснити іншими методами. Отже, застосування вентканалів, віддрукованих в тілі моделі, суттєво змінює підхід до відведення газів у ЛГМ-процесі.

Виконання вентканалів не звільняє від потреби проектувати та друкувати пористі моделі з мінімальною густиною. Також компромісним рішенням у цьому напрямі стало комбінування модельних конструкцій, які поєднують друковані елементи зі вставками з традиційного ППС. Як варіант, у місцях стикування цих елементів у процесі друкування забезпечуються повздовжні борозенки, які в контакт з вставками створюють вентканали. Це дає змогу зменшити витрати на виготовлення моделей, забезпечуючи стабільні умови відведення газів.

Теоретичні розрахунки вакуумування стінок моделей показують, що, якщо на виході з типового для ЛГМ водо-кільцевого вакуумного насоса (ВВН) досягається вакуум  $-0,8$  атм (за вакуумметром), що відповідає залишковому тиску близько 20 кПа, то на поверхні ливарної моделі у вакуумованому піску

форми в контейнерній опоці залишковий тиск може досягати 40–50 кПа. Для цього слід застосовувати вакуумпроводи не нижче ДУ 50. Тоді на поверхні випора залишковий тиск можна підтримувати на рівні 60–70 кПа для відкачування газів, які утворюються у вищевказаному зазорі, та впливу на поверхню металу для його засмоктування, який заливається крізь стояк під атмосферним тиском близько 100 кПа на рівні заливної лійки чи чаші ливарної форми. При цьому з боку форми на межі «метал-форма» діє газовий тиск близько 40–50 кПа, а в процесі виходу газів крізь випор тиск на 20 кПа більший (близько 60–70 кПа). Невисокий тиск у цьому зазорі (на противагу традиційному протитиску до 124 кПа [7]), ослаблений вакуумуванням моделі крізь випор, запобігає утворенню механічного пригару. На практиці при традиційному ЛГМ нерідко стравають вакуум форми для зменшення перепаду тиску в зазорі.

Практичні випробування показали, що рівень вакууму (розрідження) на поверхні вент був нижчим від його рівня на поверхні моделі завдяки герметизувально-протипригарному її покриттю. Це створювало оптимальні умови для газифікації моделі і не порушувало тиску на піщану поверхню, запобігаючи осипанню піску форми.

Хоча практично не існує методів гравітаційного лиття в піщані форми з ефектом вакуумного всмоктування металу, вакуум у порах піску форми, який крізь трубчастий випор частково (ослаблюючись потоком газу) передається до поверхні металу, виконує роль своєрідного насоса. Він видаляє гази одночасно із впливом на метал і збереженням умов статичної стабільності стінок форми в процесі її заливання. Це забезпечує кращі умови формозаповнення в процесі заміщення моделі, порівняно з традиційним методом ЛГМ. Вакуумування металу також позитивно впливає на його здатність проливання тонких стінок, порівняно з литтям у форми під атмосферним тиском. Рівень вакуумного відведення газів углиб піщаної форми доцільно проєктувати за принципом «чим більша газотвірність моделі, тим інтенсивніше слід видаляти гази з піщаної форми за умови непорушності її стінок». Цей принцип стає особливо корисним у разі переходу від моделей із ППС до друкованих моделей з більшою

газотвірністю, оскільки адитивні технології дають змогу змінювати конфігурацію виливків, включно із внутрішніми каналами для відведення газів, лише за рахунок внесення змін у цифрову модель продукції без наступного переформатування виробничого базису.

Додатковою перевагою запропонованої технології є можливість виведення разом із газами дрібних частинок сажі, що запобігає їх негативному впливу на якість вилівка і особливо важливо для сплавів, які можуть реагувати з вуглеводневими продуктами термодеструкції полімерних матеріалів. Застосування регульованого вакууму в порожнині форми не лише запобігає гальмуванню потоку металу та недоливам, але й може підвищити якість поверхні готових виливків разом із проливанням їх особливо тонкостінних елементів.

Описаний метод дозованого вакуумного впливу на метал корисний також для виготовлення армованих виливків за ЛГМ-процесом. Арматура, діючи як внутрішній холодильник, охолоджує метал, гальмуючи його затікання в форму. Ефект вакуумного всмоктування, навпаки, сприяє формозаповненню, що розширює спектр армування виливків у ЛГМ, включно із застосуванням у виливках армувальних перфорованих каркасів з підвищеною (завдяки перфорації) контактною поверхнею і відповідним впливом арматури на розплав матричного металу.

Запропонований спосіб переходу від підвищеного тиску газів на метал до керованого вакууму в порожнині форми для ЛГМ з ППС-моделями та друкованими полімерними моделями відкриває нові перспективи підвищення технологічної гнучкості та цифровізації цього ливарного методу, головні переваги для якості виливків якого ґрунтуються практично на нескладних законах фізики, а ливарна форма складається лише з вогнетривкого піску і знаходиться під активним відведенням газів за рахунок вакуумування в процесі заповнення її рідким металом.

Застосування 3D-друку для виготовлення випорів і моделей різної конфігурації дає змогу швидко оптимізувати програмними методами та змінювати дизайн вентиляційних систем і загалом металовиробів, скорочує

тривалість технологічної підготовки виробництва нової продукції та не потребує складного і дорогого металевого оснащення для спікання моделей з ППС. Впровадження цієї технології у промислове виробництво сприятиме підвищенню конкурентоспроможності вітчизняних ливарних підприємств та розширенню їх технологічних можливостей.

### Література

1. Серебро В. С. Основы теории газовых процессов в литейной форме. – М: Машиностроение, 1991. – 208 с.
2. Патент 157522 Україна, МПК В22 С7/02, В22С 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, С. О. Кротюк, В. С. Дорошенко, В. О. Шинський, С. І. Клименко. Опубл.30.10.2024. Бюл. 44.
3. Дорошенко В. С., Калюжний П. Б. Дьяченко М. М. Лиття за газопроникними полімернимимоделями, що газифікуються з відкачуваннямпо вентканалах газів із робочої порожнини форми // Процеси лиття, 2024. – № 2. – С. 19–28. <https://doi.org/10.15407/plit2024.02.019>
4. Дорошенко В. С., Шинський В. О. Від надмірного тиску до помірного вакууму в порожнині ливарної форми з полімерною моделлю, що газифікується / Литво. Металургія. 2025: Мат. XXI Міжнар. наук.-практ.конф. / Під заг. ред. Пономаренко О. І. – Харків: НТУ «ХП». – С. 93–97.
5. Патент 91224 Україна, МПК В22С 9/02.Спосіб формування за разовими моделями / О. Й. Шинський, В. С. Дорошенко, О. В Нейма. – Опубл. 25.06.2014, Бюл. № 12.
- 6.Патент 154450 Україна, МПК В22 С7/02, В22С 9/04. Спосіб лиття металу за моделями, що газифікуються / В. С. Дорошенко, О. Б. Янченко. Опубл.15.11.2023, бюл. 46.
7. Шинский О. И. Газогидродинамика и технология литья железоуглеродистых и цветных сплавов по газифицируемым моделям. К.: Автореф. дисс. д. т. н. 1997. 43 с.



**ABSTRACT.** The article examines ways to improve the traditional lost foam casting (LFC) process. The main disadvantages of the classical technology are analyzed, including increased gas pressure in the mold cavity, carbon penetration into the metal, and the need for significant overheating of the melt. The author proposes and investigates a method of vacuuming the internal cavity of the model directly through a system of vent channels. This approach allows for intensifying the removal of gasification products, reducing the dynamic gas pressure at the metal front, and improving mold filling. The results obtained confirm the possibility of increasing the quality of castings, reducing the risk of «misrun» defects, and expanding the technological capabilities of the method for the production of thin-walled parts.

**KEYWORDS:** lost foam casting, mold vacuuming, polymer model, gasification products, sand mold, casting optimization.