
НОВІ МЕТОДИ ТА ПРОГРЕСИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЛИТТЯ

<https://doi.org/10.15407/plit2021.03.032>

УДК 621.74.045

В. С. Дорошенко, д-р техн. наук, старш. наук. співроб. ;
e-mail: doro55v@gmail.com

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

НЕЙТРАЛІЗАЦІЯ ГАЗІВ ПРИ ЛИТТІ МЕТАЛУ ЗА МОДЕЛЯМИ, ЩО ГАЗИФІКУЮТЬСЯ, ТА ПЕРЕДУМОВИ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ ЦЬОГО 3D-ДРУКОВАНИХ МОДЕЛЕЙ

Посиленню конкурентоспроможності промислової продукції, впровадженню ресурсо- та енергоефективних технологій відповідає екологічна модернізація і підвищення продуктивності, зокрема, ливарного виробництва, як основної заготівельної бази машинобудування, а також зниження металоємності, удосконалення конструкцій виливків, в тому числі, з застосуванням 3D-технологій для виготовлення точних литих заготовок складної геометрії. У виконаному огляді способів лиття за моделями, що газифікуються, (ЛГМ) прослідковуються варіанти усунення викидів продуктів від газифікації моделі в повітря цеху та мінімізація забруднення ними піску форми. При переході від лиття за 3D-друкованими полімерними моделями, що випаляються в печах з оболонкових форм, на спосіб лиття за такими моделями, що газифікуються у вакуумованих формах з сипкого піску, з окисленням продуктів газифікації зменшується тривалість і спрощується виготовлення піщаної форми. Застосування адитивно виготовлених моделей, як приклад цифро-фізичного перетворення, несе перевагу «конструкційної свободи», що проявляється в біонічних конструкціях легковагих виливків. Вакуумована форма з випорами описаної конструкції не лише видаляє продукти газифікації, але і дозволяє частково їх знешкоджувати шляхом спалення в нагрітому металом стані, що має позитивне екологічне значення і економить витрати на витягну вентиляцію в цеху. Підвищення стабільності утримання непорушними стінок вакуумованої форми з сипкого піску і, відповідно, стабільної якості виливків за адитивно виготовленими моделями досягається застосуванням методів ВПФ (V-Process). Зменшення маси моделі за рахунок часткового заміщення її матеріалу за допомогою оснастки для виконання випорів у ливарні формі сприяє зменшенню газифікаційних продуктів до кількості, близьких до відпрацьованих способів ЛГМ за моделями з пінополістиролу.

Ключові слова: лиття за моделями, що газифікуються, адитивна технологія, 3D-друк, вакуумно-плівкова формовка, газовий режим форми, нейтралізація газів, газифікація моделі, екологічна модернізація.

Застаріле обладнання та ризики невідповідності екологічним нормативам ЄС, які планують зменшення викидів CO₂ вдвічі до 2030 року, знижують конкурентоспроможність української продукції на глобальному ринку та ставлять під загрозу

експорт на один з основних ринків збуту – ЄС [1]. Тому для посилення конкурентоспроможності виробленої в Україні промислової продукції, впровадження ресурсо- та енергоефективних технологій важливими є: екологічна модернізація [2] і підвищення продуктивності, зокрема, ливарного виробництва, як основної заготівельної бази машинобудування, зниження металоємності, удосконалення конструкцій виливків, в тому числі, з застосуванням 3D-технологій для виготовлення точних литих заготовок складної геометрії.

Статті присвячена огляду способів лиття за разовими полімерними моделями, що піддають термодеструкції в ливарних формах, та з метою досягнення більш екологічно чистого виробництва при цьому видаляються шкідливі гази. А також розглянуто спосіб екологічної безпечної нейтралізації таких газів при ЛГМ з використанням полімерних моделей, виготовлених 3D-друком, що є також одним із засобів цифровізації та автоматизації ливарництва.

Хоч найбільш поширеним є спосіб лиття металу за газифікованими моделями (ЛГМ, Lost Foam Casting Process) у вакуумованих формах з сухого піску без зв'язувальних компонентів за моделями з пінополістиролу (ППС), однак наявність моделі з ППС і значного об'єму та тиску газів при її газифікації в порожнині форми при заливанні її металом потребує досягнення оптимального рівня (балансу, рівноваги) тиску цих газів, без чого досить вірогідне виникнення у виливках дефектів. Баланс тиску газу в порожнині форми може залежати в тій чи іншій мірі від десятків факторів: від матеріалу і способу виготовлення моделі і форми до характеристик металу і способу його заливання, що докладно описано в монографії [3] та інших публікаціях, зокрема [4, 5].

Тиск газу може перевищувати на 25 % атмосферний за даними О. Й. Шинського, головне – щоб пікові значення тиску не перевищували металостатичний напір, коли може бути витиснуто метал зі стояка форми назовні [5], а також тиск газів в порожнині форми повинен бути не меншим того пресувального тиску на пісок, який утримує його від обсипання [3, 4]. При цьому не рекомендовано сполучати порожнину форми з атмосферою, повністю закриваючи модель піском [3], щоб забезпечити вказаний баланс в загерметизованій формі і видалення газу від газифікації моделі за допомогою вакуумування форми протягом того часу, коли він в ній утворюється (або застосувати витяжну вентиляцію), а також рекомендовано підтримувати в певних межах швидкість підйому металу в формі та ретельно розраховувати параметри ливникової системи. Недотримання цих основних вимог нерідко веде до браку виливків і загазованості цеху. Сукупність таких складових знижує конкурентоздатність ЛГМ, порівнюючи з литтям у традиційні піщані зі зв'язувальним.

Щоб запобігти негативного впливу продуктів деструкції моделі з ППС, яка знаходиться в ливарній формі, на ливарний процес, запропоновано [6] спалювати модель у струмені кисню, що подають у форму. Спочатку на поверхні форми підпалюють стояк чи випор моделі, тоді в зону горіння подають кисень, який по мірі горіння моделі попадає в форму, підтримуючи горіння моделі. Кисень подають мідною трубкою чи газовим різакон. Тепло від горіння і вуглекислий газ також сприяють висушуванню краски на моделі і твердінню рідкоскляної формувальної суміші [5].

Застосування цього способу також запропоновано для випалювання моделі ППС із керамічної оболонки, що виготовлена аналогічно, як при литті за моделями, що витоплюються, але не передбачено для найбільш економічно вигідного лиття у вакуумовану форму з сухого піску, бо кисень міг би засмоктуватись вакуумом вглиб піску і окислити фільтрувальні елементи форми.

Одночасно з подачею окислювального газу в залиту металом форму у вигляді продування її повітрям при ЛГМ і видалення при цьому газів витяжною вентиляцією це повітря використовують, як засіб для усунення навуглецювання сталювого виливка [7], або для регулювання швидкості охолодження виливка [8]. Останні два способи застосовують, коли газифікація моделі виконана, гази більшою мірою вийшли з форми, лише їх залишок має видалити витяжна вентиляція.

Також для ретельної витяжки газів без виходу їх у повітря цеху ливарну форму рекомендовано покривати зверху пристроєм з заслінкою (кришкою) і боковими шторами [9]. З-під кришки газу видаляють крізь вентиляційний колектор. Проте про застосування такого пристрою для ЛГМ в описі за авторством відомих фахівців-розробників способів ЛГМ не вказано. Вірогідно, цей пристрій досить громіздкий та зайвий для вакуумованих форм при ЛГМ.

Крім того, розроблено пристрій [10] для видалення газоподібних продуктів при ЛГМ за межі виробничого приміщення і створення безпечних умов праці (рис. 1). Пристрій складається з бічних стінок 1, дна 2 та верхньої кришки 3, виконаних подвійними з внутрішніми газопроникними поверхнями. Кришка 3 закріплена на телескопічному («труба в трубі») шарнірі 4, з упором 5, який встановлено на витяжному трубному колекторі 6 з можливістю обертання навколо вертикальної осі (труби) колектора 6 і зворотно поступального переміщення. Для герметичного з'єднання кришки 3 до поверхні торця бічних стінок 1 вона має ущільнювальну прокладку 7. Для перекриття каналу колектора 6 він має газовий кран 8, а кришка 3 має ручку 9.

Пристрій служить герметичною вакуумованою камерою, в яку вставляють ливарну форму (на рис. 1 не зображена). Краном 8 перекривається вертикальний канал колектора 6. При заливці металом форми з газифікованими моделями кришка 3 перебуває у відведеному положенні (зображено пунктирною лінією на рис. 1). Після включення вакуум-насоса у форму заливається метал. Відразу після закінчення заливання кришка 3 за допомогою ручки 9 піднімається, підводиться до торця бічних стінок 1 і опускається так, щоб щільно накривати торець бічних стінок 1 по їх периметру. Прокладкою ущільнювача 7 герметизують стик. Потім краном 8 відкривають канал колектора, вакуум досягається до кришки 3 з внутрішньої проникною поверхнею, чим забезпечується видалення (відсмоктування) шкідливих газів від усіх боків ливарної форми за межі приміщення. Вакуумування закінчують після припинення газовиділення з форми.

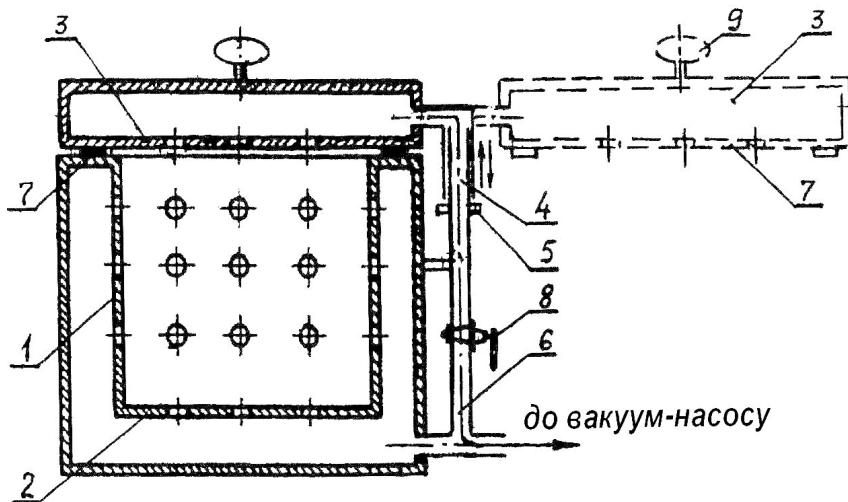


Рис. 1. Пристрій для видалення газів при ЛГМ

Очевидно, цей пристрій доречний для ливарних форм з піщаних сумішей зі зв'язувальним компонентом, бо для форм, що вакуумуються за допомогою вбудованих фільтрів в контейнерну опоку, сама така герметична опока виконує роль цього пристрою. Проте сама розробка пристрою [10] свідчить про важливість відведення газів з форми при ЛГМ для створення безпечних умов праці в ливарному цеху. Лише є недоліки в тому, що для форм з габаритами більше 1,2–1,5 м цей пристрій буде занадто громіздким і застосування кількох таких пристроїв займе значну площу цеха,

а також під час заливання металу з відкритою кришкою з значна частина газів може виділятися крізь верхню поверхню форми в приміщення цеху.

Серед способів лиття у вакуумовану форму з сипкого піску також використовують спосіб лиття з застосування вакуумно-плівкової формовки (ВПФ, V-Process), при якому метал заливають у облицьовану синтетичною плівкою порожнину форми, яку сполучають трубчастими випорами з повітрям цеху з метою подання крізь випори атмосферного тиску на стінки цієї порожнини [11, 12]. Перепад між вакуумом у піску форми і атмосферним тиском утримують непорушні міцні стінки форми за відсутності моделі з ППС і газів від газифікації, як у попередніх способах ЛГМ. Газовивідні трубчасті випори встановлюють на верхніх (на час заливання форми) опуклих частинах порожнини форми, які метал заповнює в останню чергу, щоб не було таких місць на формі, які закриті металом від вентиляції, причому сумарна площа поперечних перерізів прохідних каналів трубчастих випорів не менше, ніж в 2–4 рази, перевищує площу поперечного перерізу вузького місця стояка, крізь який заливають форму [12]. Таке співвідношення розмірів отворів для подачі металу і повітря в порожнину форми відпрацьовано на практиці і гарантує стабільну непорушність стінок форми.

Зменшення каналів випорів загрожує обсіпанням стінок форми від дії вакууму з боку цих стінок, який відкачує вглиб стінок повітря при деструкції розплавом металу синтетичної плівки, порушенні герметизації форми і зниженні зазначеного перепаду. Уточнюємо, що прохідні канали трубчастих випорів аналогічні до прийнятого в ливарній технології терміну «вузьке місце стояка». Якщо випори конусні, то діаметр прохідного каналу випора є діаметром вузького місця конусу, якщо випори циліндричні, то прохідний канал визначається діаметром циліндра.

Хоч ВПФ відноситься до одного з найбільш екологічних способів лиття, його недоліком є потреба у високоточних моделях (з багатьма вентами), не разових, як при ЛГМ, а постійних, що дає вигоду лише для досить високої серійності литва і для певних виливків, моделі яких можна облицьовувати плівкою, що стримує цей спосіб у застосуванні, зокрема для дрібносерійного виробництва, вигідного при ЛГМ, особливо литих конструкцій складної геометрії, що останнім часом все більше пов'язане з 3D-друком полімерних моделей. Проте ЛГМ для них ще не відпрацьовано.

Щодо забезпечення ливарної форми при ВПФ обов'язковими для цієї технології трубчастими випорами, то нами розроблено спосіб виготовлення таких випорів у вигляді циліндричних герметичних оболонок з синтетичної плівки, заповненими повітрям під тиском [13]. Їх зварюють чи герметизують плавким швом у вигляді балонів (закритих чи замкнених), схожих на іграшкові продовгуваті кульки, надуті стиснутим повітрям. Такі плівкові герметичні оболонки під внутрішнім тиском повітря встановлюють на моделі, формують в контакт з моделлю у піщаній формі і розгерметизовують (руйнують торці) після підключення вакуумування до цієї форми перед заливання її металом. Розрахунком міцності такої оболонки з поліетиленової плівки згідно ГОСТ 10354-82 підтверджено [13], що така плівка товщиною 0,1 мм циліндричної оболонки при тиску повітря в оболонці 0,225 кг/см² понад атмосферний без деформації оболонки всередину циліндра дозволяє заформувати у кварцовому піску такі трубчасті випори на глибину до 1,4 м, так само, як і виготовити таким методом з плівкової оболонки (балона) під внутрішнім тиском повітря порожнистого стояка для заливання форми металом [13].

Також випори у вакуумованій формі з сипкого піску нескладно виготовити за допомогою трубок, покритих синтетичною плівкою [14]. А після підключення вакууму до форми з сипкого піску перед заливання її металом трубки видаляють і залишають синтетичну плівку з цих трубок на піщаній поверхні каналів для випорів, виконаних у формі. Проте такі випори і отримані за плівковими оболонками під тиском повітря не застосовують при ЛГМ, тим більше немалих діаметрів (від 30-40 мм), бо традиційно рекомендовано модель газифікувати закритою піском форми без контакту з повітрям цеху [3].

Останнім часом одним з прикладів застосування адитивних технологій в ливарному виробництві служить 3D-друк полімерних моделей [15, 16]. Терміни «адитивне виробництво» і «3D-друк» використовують як синоніми, а ця технологія служить прикладом перетворення від цифрового (образу на комп'ютері) до фізичного (об'єкту чи твердотілого виробу), або цифро-фізичного перетворення (digital-to-physical conversion) [17].

Для лиття металу за моделями, що випаляються подібно до методу Replicast-CS [3], моделі адитивно виготовляють порожнистими у вигляді зовнішньої оболонки з внутрішніми тонкостінними каркасом чи розпірками [15], які утримують геометричну форму порожнистої моделі. На таку модель прагнуть скоротити розхід матеріалу, щоб зменшити витрати на нього, на друкування на дорогому за вартістю високотехнологічному обладнанні та витрати на випалення моделі з форми прожарюванням у печах і з утилізацію випалених газів на виході з печей. Розпірки чи каркас служать утриманню зовнішніх оболонок моделі без деформації під тиском піску тощо при виготовленні форми по порожнистій моделі. Піщану чи керамічну вогнетривку форму виготовляють оболонкову (зі зв'язувальним) по типу лиття за моделями, що виплавляються, для яких характерна висока собівартість виливків. Оболонкові форми, як правило, наносять на разову модель пошарово з тривалими сушкою і випалюванням з них полімерних моделей.

Значно нижчою була б собівартість виливків при литті за друківаними моделями, що газифікуються (ЛГМ). Але маса сучасних друківаних моделей на одиницю об'єму вища від моделей з ППС, відповідно, і газотвірність з ростом пікових тисків від можливої їх газифікації у формі. Порожнистим моделям при затіканні у форму першого металу характерний високий ступінь термодеструкції моделі від дії теплового випромінювання на внутрішню поверхню полімерної оболонки. При цьому модель швидко руйнується без поступового виділення газу, як для моделей з ППС, і, якщо закрита піском форми, то не забезпечує умови, описано в роботі [3], бо термодеструкція оболонкової моделі часто не дає рівномірного тиску і газодинамічного балансу протягом всього процесу заливання металу, що загрожує появою браку литва. Тому моделі адитивного виробництва надійніше випалювати з форм перед їх заливанням [15].

З іншого боку, з часом друківані полімерні моделі стають все дешевшими, чистота поверхні їх вища ніж у моделей з ППС, 3D-друк дозволяє в автоматичному режимі виготовити цілком такі конструкції, які для моделей з ППС лише можна було б зібрати з декількох частин. Моделям з ППС все важче і часом неможливо конкурувати з друківаними моделями для каркасних виливків біонічної конструкції, що значно економлять метал, або виконують декоративну функцію, і нині нерідко з'являються в технічній інформації. Такі конструкції моделей, що швидше надруківати, буває значно довше вирізати з ППС з великими відходами і трудовитратами. Друківані моделі відповідають новому рівню досконалості литих металовиробів. Але за друківаними моделями не описані і не відпрацьовані стабільні способи газифікації моделі у піщаній формі за способом ЛГМ разом з надійним утриманням стінок з сипкого піску і одночасною нейтралізацією газів.

Для розробки технології ЛГМ за друківаними моделями за відправну основу взяли способи ЛГМ [18, 19], які включають заливку металу у форму з виведенням газових продуктів термодеструкції моделі з ППС за межі форми за допомогою газовивідних трубок крізь піщану форму та каналів у моделі. Серед відмінностей цих способів є те, що в одному застосовують верхній підвід металу, а в другому – боковий чи сифонний до внутрішньої порожнини форми. А серед схожості – те, що вивід газів з форми від газифікації моделі страплює надмірний тиск від пікового виділення газів у формі, а також передбачене спалювання газів на виході з форми, зокрема, з застосуванням електричного їх підпалювання.

Мета наших досліджень і розробок полягала в переведенні лиття металу за адитивно виконаними моделями на метод ЛГМ у вакуумованих піщаних формах з сипкого піску зі знешкодженням продуктів газифікації моделі шляхом їх окислення (спалення)

Нові методи та прогресивні технології лиття

в нагрітому теплом металу до високої температури стані, при підвищенні стабільності збереження непорушними стінок вакуумованої форми з сипкого піску в процесі лиття та при прискоренні і спрощенні виготовлення піщаної форми за такими моделями. Мотивація полягала в тому, що формовка при ЛГМ-процесі достатньо відпрацьована, нескладна і часто автоматизована, полягає в засипанні і віброущільненні протягом близько 1,5 хв сухого піску в контейнерну опоку з використанням некапіталоємного обладнання.

На питання: «який вид 3D-друку в ливарному виробництві найбільш легко і вигідно сьогодні застосувати?», є очевидне наступне обґрунтування. З урахуванням чи не найнижчої собівартості литва невисокої серійності при ЛГМ [20] найнижчу зміну собівартості виливків дасть друк саме полімерної моделі, принтери для такого друку найбільш поширені, нескладні і недорогі, на відміну від обладнання для друку піщаних форм чи друку виливків. 3D-друк моделі за вартістю практично однаковий з вирізанням моделі на 3D-фрезері, а для моделей складного профілю і зекономити на збірці з частин моделей, які неможливо виготовити цілими на 3D-фрезері чи в прес-формі.

Таким першим вітчизняним прикладом лиття за моделлю, що на 3D-принтері віддрукована з гладкою тонкою полімерною оболонкою (коркою) на каркасі з розпірок, може служити виготовлення В. С. Мельником (<http://1-d.com.ua>) методом ЛГМ кількох десятків чавунних деталей колон ліхтарів (рис. 2) при реконструкції історичних ліхтарів для Маріїнського парку м. Києва [16].



Рис. 2. Чавунна декоративна частина колони і деталь, вилита за друкованою моделлю

Виконуючи поставлене завдання при розробці способу лиття металу за адитивно виготовленими моделями, що газифікуються у вакуумованих формах з сипкого піску, з окисленням продуктів газифікації, вирішили використати порожнину друкованої моделі, за методом ВПФ, з'єднавши її газовивідними трубчастими випорами крізь вакуумовану форму з сипкого піску з повітрям над формою. А при виході випора на поверхню форми поставити запальники для спалення газів, що виходять від газифікації моделі. Причому сумарна площа поперечних перерізів прохідних каналів таких випорів повинна не менше, ніж в 2 рази, перевищувати площу поперечного перерізу вузького місця стояка. Тоді форма буде відповідати умовам ВПФ з надійним утриманням стінок вакуумованої форми.

Крім того, при адитивному виготовленні порожнистої моделі у вигляді зовнішньої оболонки з внутрішніми тонкостінними каркасом чи розпірками частину каркасу чи розпірок доцільно замінити циліндричними герметичними оболонками з синтетичної плівки, заповненими повітрям під тиском, а також продовжити ці герметичні оболонки з синтетичної плівки за межі порожнистої моделі до верхньої поверхні форми, а після підключення вакууму до піщаної форми перед заливання її металом верхню і нижню частину цих оболонок і з синтетичної плівки пропалювати і утворити з них трубчасті випори.

Як варіант, при адитивному виготовленні порожнистої моделі у вигляді зовнішньої оболонки з внутрішніми тонкостінними каркасом чи розпірками частину каркасу чи розпірок можливо замінити трубками, покритими синтетичною плівкою, а також продовжити ці трубки за межі порожнистої моделі до верхньої поверхні форми та облякати ними випори, а після відключення вакууму до форми з сипкого піску перед заливання її металом трубки видалити і залишити синтетичну плівку з цих трубок на поверхні виконаних випорів.

При цьому поєднали 3D-друкування моделі, методи виготовлення каналів випорів у сипкому вакуумованому піску, а також методи спалювання газу, що виходить крізь ці канали. Модернізуючи традиційні різновиди технологій ЛГМ [3], порожнину разової моделі сполучили каналами з повітрям за межами ливарної вакуумованої форми з сипкого піску. Гравітаційна засипка плинного піску навколо моделі з вібрацією засипаної форми у контейнері (відпрацьована проста операція) несе з собою найменшу силову дію на модель на відміну від типового ущільнення на порядок більш широко вживаних піщаних сумішей зі зв'язувальним та з застосуванням силового їх ущільнення. Застосування сипкого піску форми не потребує значного зміцнення моделі, допускає мінімум внутрішніх розпірок і економить час виготовлення моделі. А також формовка у сипкому піску значно швидша і дешевша за виготовлення оболонкової форми навколо цієї адитивно виготовленої моделі з наступним її випалюванням, як описано [15].

На відміну від суцільної моделі [18] у порожнинній оболонковій полімерній моделі не треба виконувати вентиляційні наколи і заливати метал зверху моделі, щоб цим виконати газовідвідний канал знизу до верху, бо застосовують (як канал) в оболонковій моделі її суцільну порожнину з тонкими розпірками чи каркасом, і для неї можливе будь-яке, а краще нижнє чи ступінчасте підведення металу, що рекомендовано [3] для ЛГМ як більш вигідне з огляду підняття металу у формі знизу вверх для стабільної якості виливків. Відсутність операції пропалювання наколів у стінці моделі, коли також можливе непопадання на струмінь у фігурній стінці, знижує час виготовлення моделі.

Загалом, у розробленому способі ЛГМ переваги адитивної порожнистої моделі [15] поєднали їх із перевагами способу лиття з виводом газів із форми (з сипкого піску) і їх спалюванням [18, 19], способу ВПФ [11] з його технологічними вимогами [12] з урахуванням найбільш оптимальних режимів ЛГМ [3, 4].

Описана вище швидка початкова газифікація порожнинної полімерної моделі при заливанні металу у вакуумованій формі дозволяє вільно вивести крізь трубчасті випори газу і спалити їх при підпалюванні газів бризками металу чи факелом [18], або більш надійним підпалюванням електричними запальниками [19] над трубчастими випорами. Коли газифікація з порожнини моделі від дії металу, що заливається, зменшила матеріал моделі на стільки, що почалось падіння тиску, а порожнині форми з залишками моделі, потрібна подача до порожнини форми повітря задля недопущення падіння в ній тиску який сприяє утриманню стінок форми [3]. Для цього застосовано випори, як при ВПФ. Тоді піщану форму можна розглядати, як форму при ВПФ з досить товстою синтетичною плівкою, роль якої грає полімерна оболонка друкованої порожнистої моделі.

Тобто, якщо є надмірні газу, то їх виводять і спалюють при заливанні з будь-яким підведенням металу, а, якщо їх спалили і йде засмоктування повітря, то випори його впускають, гарантуючи за обох умов стабільний тиск на стінки форми, за наявності чи відсутності будь-якого флуктуаційного режиму, що описано як складності при литті у вакуумовану форму за способом [18]. Такий газовий режим дає стабільну

непорушність стінок піщаної форми і спрощує спосіб ЛГМ, бо технологічна підготовка (що базується на розумінні непростой газодинаміки процесу) і контроль для досягнення описаного вище балансу газів, необхідного для утримання форми з сипкого піску і запобігання його осипанню, відпадає. Це робить більш надійним процес ЛГМ, з огляду мінімізації браку виливків і зменшення вимог до газифікації моделі, її густини тощо, оскільки з моделі усувається роль «постачальника» газів. Також випори невеликих розмірів на верхніх (стельових для ливарної порожнини форми) опуклих частинах разової моделі, характерні для ВПФ, сприяють «вимиванню» металевим розплавом в тіло випору твердих (кокових) залишків, можливих при газифікації моделі, що сприяє більшій чистоті металу виливка.

Умови для сумарної площі прохідних отворів випорів у формі взято з їх мінімальним перевищенням (на основі вимог [12]) не менше, ніж у 2, рази площі поперечного перерізу вузького місця стояка, оскільки ці випори на подачу повітря у форму діють практично не весь час заливання форми, як при ВПФ, а після газифікації частини моделі з відповідним тиском газів в порожнині форми від таких газів. Площу перерізу вузького місця стояка розраховують для кожного виливка, для поперечного перерізу порожнинного отвору стояка при ВПФ ця площа дорівнює площі отвору у вузькому місці стояка у виді невеликого конусу, а при виконанні при ЛГМ моделі такого стояка з ППС, вона буде дорівнювати площі перерізу вузького місця моделі стояка з ППС.

Застосування способів виконання каналів у сипкому піску при ВПФ [13, 14], облицьованих плівкою, з використанням циліндричних оболонок, напружених підвищеним тиском повітря, або на пружних циліндричних опорах поширили додатково для часткової заміни каркасних опор чи розпірок, які є внутрішнім начинням адитивно виконаної оболонкової моделі з виконанням отвору в цій оболонці. Часткове «занурення» трубок в модель, на скільки це дозволяє її конфігурація, частково заміщує полімерний матеріал моделі, каркасу чи розпірок, знижуючи загальну масу полімеру у формі. Виходячи з моделі, трубки досягають верхньої поверхні форми, формуючи канали випорів. Трубки вставляють у модель на конструкційно можливу глибину, або так вставляють плівкові оболонки з повітрям під тиском, а після підключення вакууму до форми з сипкого піску (коли форма зміцнюється, а формотворна роль моделі вичерпана) перед заливання її металом трубки видаляють і залишають лише синтетичну плівку з цих трубок на поверхні виконаних випорів. Вакуум міцно присмоктує цю плівку до стінки каналу випора, як і оболонкову поверхню моделі.

При виготовленні форми міцні трубки з пружного листового металу утримують друковану модель від деформації. Трубки мають вертикальний розріз і розтиснуті розпірками [14], після видалення яких діаметр трубок зменшується (не менше на 1,0–2,0 мм) шляхом повернення в початкове положення пружного матеріалу стінок трубок. Як матеріал для трубок придатний пружний матеріал завтовшки 0,1–1,0 мм, залежно від величини трубок, наприклад, пружний пластик, алюмінієвий сплав типу Д16, вуглецева сталь та ін. Для лабораторних випробувань застосовували листовий алюміній порожньої алюмінієвої банки, що виготовлена згідно ГОСТ Р 51756-2001 для харчових напоїв з товщиною стінки по циліндру 0,11 мм. У вихідному стані діаметр згорнутої трубки – 27 мм, а з розпіркою – 30 мм. При такому стоншуванні трубку легко видалити з форми перед заливкою металу. Пластикові трубки з пружного матеріалу і повздовжніми розрізами можна розміщати методом трубка в трубці без суміщення розрізів, розпірати внутрішньою вставкою по діаметру на близько 1–2 мм більшою за початковий діаметр та покривати плівкою.

Заміщення матеріалу моделі методами виготовлення випорів зменшує матеріалоемність і газотвірність конструкції модельного блоку з можливістю досягнення його маси, порівняної чи меншої, ніж для моделей з ППС, що сприяє переходу друкованих моделей на ЛГМ, веде до меншої потреби перегрівання металу з витратами тепла на газифікацію полімерів, а також менших витрат на утилізацію продуктів газифікації, що всмоктує вакуумна форма.

Плівки випорів і оболонка моделі при вакуумуванні форми за способом ВПФ

герметизують робочу частину форми поки цю герметизуючу функцію не замінить метал вилівка. Якщо при ЛГМ модель з ППС по мірі заміщення її металом є рухомим джерелом газів, яке рухає метал поперед себе по мірі заповнення форми, а герметизуючу функцію покладено здебільшого на протипригарну фарбу на моделі, то у цьому способі, суміщеному з ВПФ, функцію моделі як носія газів не застосовують. Краще мати від полімерів менше газів, які слід знешкодити спаленням.

Порожниста модель з трубчастими випорами є повністю газопроникна зсередини, що спрощує (відносно способу [18]) вивід газів на поверхню вакуумованої форми за будь-яких ливникових систем для знешкодження (окислення) продуктів газифікації. Канали випорів, товщі більше, ніж вдвічі, за вузьке місце стояка, цим способом ЛГМ взаємодоповнено способом ВПФ. Створено, так би мовити, «гібридний» спосіб формовки-лиття методом ЛГМ з нейтралізацією газів при їх виводі з отворів випорів і доповненні технологічних операцій від ВПФ.

Приклад реалізації способу полягав у виготовленні в дослідному ливарному цеху методом ЛГМ вилівка «секція декоративна» з сірого чавуну масою 58 кг. Вилівок являв собою плоску ґратчасту секцію з отворами і рамою по периметру, друковану оболонкову полімерну модель якої з внутрішніми розпірками і сифонною ливниковою системою формували в піску, поставивши на піщаний шар в ливарному контейнері рамою на торець. Попередньо на верхній частині моделі встановили два випори діаметром 30 мм із більш, ніж у 2 рази, сумарною площею поперечних перерізів більшою, ніж площа поперечного перерізу вузького місця стояка. При цьому заглибили облицьовані по циліндру поліетиленовою плівкою трубки з розпірками в раму і стінки моделі, для чого було висвердлено в них відповідні отвори. Щілини стиків плівки випорів і оболонки моделі заклеїли тонкою клейкою стрічкою (скотчем) і пофарбували протипригарною фарбою модель з випорами. Після засипання в контейнері моделі піском і його ущільнення вібрацією випори виступали над рівнем піску на висоту до 20 мм. Поверхню піску форми покрили синтетичною плівкою, вирізали у ній отвори для випорів, поставили на стояк воронку, підключили до форми вакуум і видалили розпірки з трубок випорів та самі трубки. Стики плівок випорів і плівки на піску форми загерметизували скотчем, плівки вакуумом притягувались до піщаної поверхні. Над обома отворами випорів встановили конусні надставки з піщано-рідкоскляної суміші не вище рівня воронки аналогічно [18] (можливе застосування конусних надставок з жести), а також на конусні надставки над їх отворами поставили електричні іскрові запальники аналогічно [19].

З початку заливання металом вакуумованої форми над конусними надставками спалахнув вогонь, полум'я горіло 22 с і згасло, коли у отворі конусних надставок засвітився метал, повільно долили до появи потоку металу з-під надставки і завершили заливання. Повний час заливання склав 28 с. Після охолодження і вибивання вилівка його огляд показав високу якість поверхні і відсутність дефектів.

При заливанні був повністю відсутній дим, подібно до горіння природного газу на кухонній плиті, що відповідає прийнятним умовам праці в ливарному цеху. Значна частина газів вийшла крізь випори і без диму згоріла, решта газів при усмоктванні у форму була видалена з форми вакуумним насосом чи могла частково осісти в піску як конденсат. Згоряння газів за межами форми значно знижує потужності і енергозатрати витяжної вентиляції цеху для видалення з повітря газів, що форма виділяє при газифікації осадженої в піску твердої фракції від деструкції моделі. Зі зниженням газопроникності протипригарної фарби на моделі (тобто, з більшим ступенем герметичності порожнини форми) можна до мінімуму знизити насичення піску продуктами газифікації моделі, спалюючи без диму переважно більшість продуктів газифікації моделі з вихідних отворів на поверхні форми чи конусних надставок за допомогою кисню з повітря. Деяке обмеження застосування цього методу здебільшого для виготовлення середніх чи крупних виливків пояснюється складністю встановлення випорів на дрібних тонкостінних моделях.

Таким чином, у виконаному огляді способів ЛГМ прослідковується удоскона-

Нові методи та прогресивні технології лиття

лення варіантів усунення викидів продуктів від газифікації моделі в повітря цеху та мінімізація забруднення ними піску форми. При переході від лиття за друкованими полімерними моделями, що випаляються в печах з оболонкових форм [15], до способу лиття за такими моделями, що газифікуються у вакуумованих формах з сипкого піску, з окисленням продуктів газифікації зменшується тривалість і спрощується виготовлення піщаної форми. Застосування адитивно виготовлених моделей, як приклад цифро-фізичного перетворення, несе перевагу «конструкційної свободи», що проявляється в біонічних конструкціях легковагих виливків. Вакуумована форма з випорами описаної конструкції не лише видаляє продукти газифікації, але і дозволяє частково їх знешкоджувати шляхом спалення в нагрітому металом стані, що має позитивне екологічне значення і економить витрати на витяжну вентиляцію в цеху. Підвищення стабільності утримання непорушними стінок вакуумованої форми з сипкого піску і, відповідно, стабільної якості виливків за адитивно виготовленими моделями досягається застосуванням методів ВПФ. Зменшення маси моделі за рахунок часткового заміщення її матеріалу за допомогою оснастки для виконання випорів у формі сприяє зменшенню газифікаційних продуктів до кількості, близьких до відпрацьованих способів ЛГМ за моделями з ППС.

Список літератури

- 1 Національна економічна стратегія на період до 2030 року. Затверджена постановою Кабміну України від 3.03.2021 р. № 179. URL: <https://nes2030.org.ua/>.
- 2 Дорошенко В. С. Исследования и технологические разработки для декарбонизации процессов точного литья. *Литейное производство*. 2018. № 4. С. 22–28.
- 3 Шуляк В. С. Литье по газифицируемым моделям. Санкт-Петербург: Професионал. 2007. 405 с.
- 4 Дорошенко В. С., Бердыев К. Х. Газодинамический баланс в песчаной форме при литье по газифицируемым моделям. *Литье Украины*. 2016. № 4. С. 20–24.
- 5 Нестеров Н. В., Полякова Е. Н. Прогнозирование выбросов металла при литье по газифицируемым моделям. Вестник МАНЭБ. 2011, Т. 16. № 3. С. 46–52.
- 6 А. с. СССР 217606. МПК В22С 9/04. Способ удаления из литейной формы газифицируемой модели / В. Н. Иванов, А. В. Лакедемонский, Г. И. Пленцов и др. Оpubл. 07.05.1968, Бюл. 16.
- 7 А. с. СССР 533444 А1. МПК В22С 9/04. Способ защиты отливок от науглероживания. / В. С. Шуляк, П. С. Сорока, С. Ф. Зяхор. Оpubл. 30.10.1976. Бюл. 40.
- 8 Патент 43694 Україна, МПК В22D 27/04. Спосіб охолодження виливків у ливарній формі, контейнері / І. О. Шинський, О. Й. Шинський, П. М. Каричковський та ін. Оpubл. 25.08.2009, Бюл. № 16.
- 9 А. с. СССР 823767 А1. МПК F24F 7/06, В08В 15/02. Устройство для удаления газообразных вредностей / В. С. Шуляк, В. В. Чайкин, А. В. Мостовой и др. Оpubл. 23.04.1981, Бюл. 15.
- 10 Патент 105206 Россия, МПК В22С 9/04. Устройство для удаления газообразных продуктов при литье по газифицируемым моделям / А. В. Кукса, Н. А. Кидалов, В. А. Закутаев. Оpubл. 10.06.2011, Бюл. № 16.
- 11 Минаев А. А., Ноткин Е. Б., Сазонов В. А. Вакуумная формовка. М.: Машиностроение, 1984. 216 с.
- 12 Барский В. Т. Производство литых заготовок методом вакуумно-пленочной формовки. М.: ЦНИИЕЭстроймаш, 1985. 40 с.
- 13 Патент 2020026 Россия, МКИ В22С 9/02. Способ изготовления форм вакуумно-пленочной формовки / В. С. Дорошенко, Н. И. Шейко. Оpubл. 30.09.1994, Бюл. № 18.

- 14 Патент UA 85515, МПК В22С 9/02. Спосіб виготовлення вакуумованих форм / О. Й. Шинський, В. С. Дорошенко. Опубл. 26.01.2009, Бюл. № 2.
- 15 Митраков Г. Н., Евдокимов С. Н., Лаврик Е. Г., Сазонов В. С. Использование аддитивных технологий при литье по выжигаемым моделям. *Омский научный вестник*. 2015. № 2. С. 80–84.
- 16 Дорошенко В. С. 3D-друкована полімерна модель для газифікації у формі. Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2021: матеріали науково-технічн. конф., 28–29.04.2021, м. Київ / ред. Р. В. Лютий, І. М. Гурія. Київ: КПІ ім. І. Сікорського, 2021. С. 77.
- 17 Industry 4.0: How to navigate digitization of the manufacturing sector. McKinsey Digital (2015). URL: https://www.mckinsey.de/files/mck_industry_40_report.pdf.
- 18 Патент 67906 Україна, МПК В22 С9/04. Спосіб лиття за моделями, що газифікуються / О. Й. Шинський, В. Т. Шульга, Л. П. Вишнякова та ін. Опубл. 10.09.2007, Бюл. № 14.
- 19 Патент 147217 Україна, МПК В22 С7/07, В22 С9/04. Спосіб лиття металу за моделями, що газифікуються, з окисненням продуктів газифікації / О. Й. Шинський, В. С. Дорошенко. Опубл. 21.04.2021, Бюл. № 16.
- 20 Шинский О. И., Дорошенко В. С. Варианты использования на роторно-конвейерных линиях способов литья с кристаллизацией металла под давлением. *Процеси лиття*. 2019. № 6. С. 38–51

Надійшла 24.06.2021

References

Надійшла 24.06.2021

- 1 National economic strategy for the period up to 2030. Approved by the decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 3.03.2021 No. 179. URL: <https://nes2030.org.ua/>. [in Ukrainian]
- 2 Doroshenko V. S. (2018). Research and technological development for decarbonization of the exact casting processes. *Litejnoe proizvodstvo*. No. 4. P. 22–28. [in Russian]
- 3 Shulyak V. S. (2007). Casting on gasified models. Sankt-Peterburg: Professional. 405 p. [in Russian]
- 4 Doroshenko V. S., Berdyev K. H. (2016). Gas-dynamic balance in a sandy mold when casting according to gasified models. *Lite Ukrainy*. No. 4. P. 20–24. [in Russian]
- 5 Nesterov N. V., Polyakova E. N. (2011). Forecasting metal emissions during casting using gasified models. *Vestnik MANEB*. Vol. 16. No. 3. P. 46–52. [in Russian]
- 6 A. s. SSSR 217606. МПК В22С 9/04. Method of removing a gasified model from a casting mold / V. N. Ivanov, A. V. Lakedemonskij, G. I. Plencov et al. Publ. 07.05.1968, Bul. 16. [in Russian]
- 7 A. s. SSSR 533444 A1. МПК В22С 9/04. Method of protecting castings from carburization / V. S. Shulyak, P. S. Soroka, S. F. Zyahor. Publ. 30.10.1976, Bul. 40. [in Russian]
- 8 Patent 43694 of Ukraine, МПК В22D 27/04. Method of cooling castings in foundry mold, container / I. O. Shinskij, O. J. Shinskij, P. M. Karichkovskij et al. Publ. 25.08.2009, Bul. 16. [in Ukrainian]
- 9 A. s. SSSR 823767 A1. МПК F24F 7/06, B08B 15/02. Device for removing gaseous hazards / V. S. Shulyak, V. V. Chajkin, A. V. Mostovoj et al. Publ. 23.04.1981, Bul. 15. [in Russian]
- 10 Patent 105206 of Russia, МПК В22С 9/04. Device for the removal of gaseous products during casting according to gasified models / A. V. Kuksa, N. A. Kidalov, V. A. Zakutaev. Publ. 10.06.2011 10.06.2011, Bul. 16. [in Russian]
- 11 Minaev A. A., Notkin E. B., Sazonov V. A. (1984). Vacuum molding. M.: Mashinostroenie. 216 p. [in Russian]

- 12 Barskij V. T. (1985). Production of cast blanks by vacuum film molding. M.: CNIIEEStrojmach. 40 p. [in Russian]
- 13 Patent 2020026 of Russia, MKI B22C 9/02. The method of manufacturing molds of vacuum-film molding / V. S. Doroshenko, N. I. Shejko. Publ. 30.09.1994, Bul. 18. [in Russian]
- 14 Patent UA 85515, МПК B22C 9/02. Method of manufacturing vacuum molds / O. J. Shinskij, V. S. Doroshenko. Publ. 26.01.2009, Bul. 2. [in Ukrainian]
- 15 Mitrakov G. N., Evdokimov S. N., Lavrik E. G., Sazonov V. S. (2015). The use of additive technologies in casting for burned-out models. *Omskij nauchnyj vestnik*. No. 2. P. 80–84. [in Russian]
- 16 Doroshenko V. S. 3D printed polymer model for gasification in the mold. *Novi materiali i tehnologiyi v mashinobuduvanni-2021: materiali nauchn. -tehnichn. konf.*, 28–29.04.2021, Kyiv / Edit. by R. V. Lyutij, I. M. Guriya. Kyiv: KPI named by I. Sikorskogo, 2021. P. 77. [in Ukrainian]
- 17 Industry 4.0: How to navigate digitization of the manufacturing sector. McKinsey Digital (2015). URL: https://www.mckinsey.de/files/mck_industry_40_report.pdf.
- 18 Patent 67906 of Ukraine, MPK B22 C9/04. The method for molding models that gasification / O.J. Shinskij, V.T. Shulga, L.P. Vishnyakova ta in. Opubl. 10.09.2007, Bul. 14. [in Ukrainian]
- 19 Patent 147217 of Ukraine, MPK B22 C7/07, B22 C9/04. Method of metal casting according to gasified models with oxidation of gasification products / O. J. Shinskij, V. S. Doroshenko. Publ. 21.04.2021. Bul. 16. [in Ukrainian]
- 20 Shinskij O. I., Doroshenko V. S. (2019). Variants of using molding methods with crystallization of metal under pressure on rotary-conveyor lines. *Casting processes*. № 6. P. 38–51. [in Russian]

Received 24.06.2021

V. S. Doroshenko, *Dr. Sci. (Engin.)*, Senior Research Scientist;
e-mail: doro55v@gmail.com

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

NEUTRALIZATION OF GASES DURING METAL CASTING ACCORDING TO GASIFIED MODELS AND PREREQUISITES FOR USING 3D PRINTED MODELS FOR THIS

Strengthening the competitiveness of industrial products, introducing resource and energy efficient technologies is responsible for environmental modernization and increasing productivity, in particular, of foundry, as the main procurement base of mechanical engineering, as well as reducing metal consumption, improving cast designs, including using 3D technologies for manufacturing precise cast blanks of complex geometry. In the performed review of methods of Lost Foam Casting (LFC) Process, options are traced for eliminating product emissions from gasification of the model into the air of the shop and minimizing their contamination of the sand of the mold. With the transition from casting according to 3D-printed polymer models, which are burned out in furnaces from shell molds, to the casting method according to such gasified models in evacuated molds from loose sand, with the oxidation of gasification products, the duration decreases and the production of a sand mold is simplified. The use of additively manufactured models, as an example of digital-physical transformation, has the advantage of "structural freedom", which manifests itself in bionic structures of lightweight castings. The evacuated form with holes (overflows) of the described design not only removes gasification products, but also allows them to be partially neutralized by burning them in a heated metal state, has a positive environmental impact and saves costs for exhaust ventilation in the workshop. An increase in the stability of the content of inviolable walls of the evacuated mold from loose sand and, accordingly, the stability of the quality of castings according to additively manufactured models is achieved by using the V-Process methods. By reducing the mass of the model due to the partial substitution of its material with the help of equipment for making holes (overflows) in the casting mold, it helps to reduce the amount of gasification products in an amount close to the spent LFC methods with models made of expanded polystyrene.

Keywords: Lost Foam Casting Process, additive technology, 3D printing, vacuum-film molding, mold gas regime, gas neutralization, model gasification, ecological modernization.