

В.О. Шинський, наук. співр., e-mail: shynskyvo@nas.gov.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5033-1199>

В.С. Дорошенко, д-р техн. наук, ст. наук. співр., пров. наук. співр., e-mail: doro55v@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0002-0070-5663>

С.І. Клименко, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: ukrdepl15@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2431-451X>
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

Сучасний стан і перспективи розвитку процесу лиття металу за моделями, що газифікуються

Збільшення потужності ливарного виробництва може зіграти вирішальну роль в відновленні машинобудівного і оборонного секторів промисловості України. Розглянуто сучасний стан і перспективи розвитку технології ливарного виробництва — лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ), а також її можливості для збільшення об'єму переробки металу до готових деталей на прикладі Китаю. Для ливарних цехів малосерійного лиття, яким необхідне швидке виготовлення ливарних моделей, метод ЛГМ сприяє мінімізації капітальних і поточних витрат. Процеси плавлення, лиття та обробки при ЛГМ такі ж, як і в типових ливарних процесах, за винятком потреби в вищій температурі заливки форм на 30–50 °С. Процес виготовлення моделей з пінополістиролу (ППС) розроблено у кількох варіантах і початково може бути реалізовано в невеликих масштабах для отримання пробних виливків. Існуюче ливарне підприємство після проведення успішних випробувань зі спрощеним процесом ЛГМ може збільшити розміри партій виливків разом з розширенням інвестицій в оснастку та обладнання для цього. Механічна обробка при отриманні піномodelей вигідна для обсягів менше 100 виливків, а для серії понад 1000 виливків (поширене використання ЛГМ) застосовують спікання гранульованого ППС в прес-формах, включно з використанням для цього автоматизованого обладнання. За кількістю твердих і газоподібних відходів ЛГМ в формах з сухим вакуумованим піском екологічно переважає більшість ливарних процесів. Процес ЛГМ постійно розвивається і вдосконалюється, легко включає в послідовність своїх операцій 3D-технології та піддається цифровізації, автоматизації, роботизації і масштабуванню, відноситься до високоточного лиття в піщані форми з застосуванням некапіталомісткого обладнання. Приклад Китаю показує можливість швидкого збільшення випуску виливків в широкому діапазоні їх ваги, номенклатури і виду застосовуваних металевих сплавів.

Ключові слова: лиття за моделями, що газифікуються; 3D-технології; 3D-друк; разова модель; ливарний цех; відновлення промисловості України.

За урядовими планами Україна має переробляти на метал більшість руди власного видобутку, а метали — на готову продукцію [1]. Україна дев'ята у світі за експортом металів (19 млн т на рік) та експортує велику кількість руди, яку за планом післявоєнного відновлення слід переробляти всередині країни. Адже тонна руди коштує 100—150 USD (доларів США), тонна металу — 500—1000 USD, а готові металеві вироби такої ж маси — 1,5—2 тис. USD. Якщо з металевих виробів виготовляти енергетичні машини, то ціна доходить до 15—20 тис. USD за тону [1]. Заради безпеки Україна збільшить виробни-

цтво зброї на підприємствах військово-промислового комплексу (ВПК), а саме виробництво усіх основних видів озброєння: від протиповітряної оборони до бронетехніки, ракет, стрілецької зброї, боєприпасів, літаків та кораблів. Для цього слід сформувати потужний військово-промисловий комплекс з локалізацією виробництва не менше 60 %. Україна ставить за мету за десять років збільшити валовий внутрішній продукт (ВВП) до \$1 трлн [2] і робитиме ставку на military-tech, наслідуючи приклад країн, що демонструють, як високі військові технології можуть стати двигуном цивільної економіки [1].

Ливарне виробництво, як основа заготівельної переробки металів в машинобудуванні і для виготовлення оборонної металопродукції, може зіграти вирішальну роль у відновленні машинобудівного і оборонного секторів промисловості України. Метою статті є огляд сучасного стану і перспектив розвитку однієї з найбільш універсальних з огляду вагового діапазону виливків і ресурсоощадних технологій ливарного виробництва — лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ), а також потенціалу цієї технології для швидкого збільшення об'єму переробки металу в Україні до готових деталей, в тому числі з урахуванням таких прикладів у світовій промисловості.

Журнал *Modern Casting* зазначає, хоч ЛГМ має значні переваги перед іншими ливарними процесами, проте поки характеризується невисокими результатами щодо комерціалізації [3]. Частково це пояснюється сприйняттям процесу як такого, що вимагає великих початкових капітальних вкладень і витрат на оснастку та робить його придатним лише для великого виробництва. Але для організації лиття за разовими моделями з пінополістиролу (ППС) нерідко не потрібно інвестувати в капітальне обладнання і часто — навіть в оснастку, щоб організувати ЛГМ-процес. За скромну вартість необхідної сировини будь-який ливарний цех, що виготовляє виливки з залізовуглецевих чи кольорових сплавів, може швидко виготовити за разовими моделями дрібносерійні виливки, зокрема оснастку та інструменти для прототипів, запасних частин або інших деталей невеликих обсягів [3]. Лінії ЛГМ мають одну з найнижчих капіталомісткостей серед видів лиття, що показано нижче.

Серед переваг способу ЛГМ є те, що він дозволяє продукувати виливки складної геометрії, нерідко такі, що їх досить дорого за витратами виготовити в традиційних формах в парних опоках. Одним з прикладів цього є чавунні валки (рис. 1), єдиним варіантом лиття яких, як описано в роботі [4], був процес ЛГМ. Ці виливки мають дрібні зубці із зворотним ухилом з огляду протяжки моделі. Кожен зубець також має

невелику чашечку під тильною стороною. Виробник лиття виготовляв моделі вирізанням з ППС-заготовок.

Дослідження на замовлення Міністерства енергетики США (DOE) визначили, що порівняно з традиційними методами лиття ЛГМ забезпечує 25—30 % економії енергії, 46 % економії за продуктивністю праці, на 7 % менше вартості використовуваних матеріалів і можливість зниження собівартості продукції на 20—25 % [3]. У порівнянні з традиційними процесами утворюється менше твердих відходів, а також менше викидів твердих частинок у повітря та парникових газів. Додаткова перевага полягає в тому, що за належної конструкції ливникової системи вихід придатного литва сягає понад 70 %, а за певних умов він є можливим і понад 80 % [3].

Для моделі з механічно обробленого ППС допуск розміру залежить від точності обробки і зазвичай становить 0,05 мм (на 25 мм [5]) плюс допуск на обробку виливка. Недавнє дослідження, проведене в США [6], показало, що для тонкостінного високоміцного чавуну (ВЧ), навіть товщиною литої стінки 1 мм, допуск розміру такої стінки становив $\pm 0,039$ мм. Ця ключова перевага ЛГМ означає, що виливки при такому литті можна використовувати з нульовою або мінімальною механічною обробкою металу. З належним перепроектуванням металевих заготовок це може призвести до значної економії коштів, яка компенсує дещо вищу вартість виливків порівняно з традиційними процесами лиття у сирі форми чи за процесом «по баче» (у форми з холоднотвердних сумішей, ХТС) для серійного литва [3]. Коротке порівняння показників процесів лиття показано в таблиці.

Як показано на рис. 2, ЛГМ також дозволяє без застосування піщаних стрижнів виготовляти порожнисті і ажурно-тонкостінні виливки, що можуть мати складну геометрію, в тому числі внутрішніх каналів і глухих отворів. Деталі можуть мати нульові або змінні уклони, а також литу різьбу, що відпрацьовано зокрема крупносерійним литтям гайок для стяжки будівельної опалубки чи для кріплень ізоляторів для електрожив-

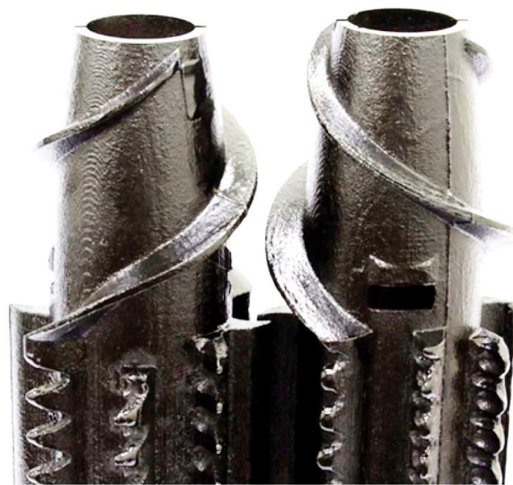


Рис. 1.

Виливки чавунних валків, що отримали перший приз у конкурсі «виливок року» у США (на фото праворуч видно чашечки на зубцях) [4]

Короткий порівняльний опис процесів лиття [5]

Тип процесу чи ливарної форми	Вартість праці за одиницю	Вартість обладнання	Шорсткість поверхні, $\mu\text{m CLA}$	Точність мм	Мінімальний переріз мм
Сира форма	Середня	Низька	500—1000	$\pm 2,5$	5,0
Оболонкова форма	Низька	Середня	100—300	$\pm 0,25$	2,5
Відцентровий	Низька	Середня	100—500	$\pm 0,7$	8,0
За моделями, що витоплюються	Висока	Середня	25—125	$\pm 0,06—25$	0,6
Лиття під тиском	Низька	Середня	100—250	$\pm 0,4 + 0,05$ на 25 мм	2,5
Лиття під низьким тиском	Низька	Середня	40—100	$\pm 0,05 + 0,05$ на 25 мм	1,2
Безперервне лиття	Низька	Висока	100—200	$\pm 0,12$ на 25 мм	8,0
ЛГМ	Низька	Низька	60—300	$\pm 0,05 + 0,05$ на 25 мм	1,0

лення залізничного транспорту тощо.

ЛГМ може усунути потребу в оснастці для виготовлення моделей при механічному вирізанні моделей, в тому числі на 3D-фрезері з ЧПУ [7], або при друкуванні поверхневої оболонки [8] (рис. 3, а) чи окремих деталей моделі [9] (рис. 3, б) на 3D-принтері і наступному кріпленні їх на підкладці чи основі з ППС при збиранні в цільну модель. При цьому поверхня такої підкладки може служити лиш опорою друкованих деталей, не відтворювати поверхню виливка і виготовляться з ППС низької густини та мати негладку поверхню. Було проведено експерименти, які показали, що ЛГМ з друкуванням оболонки моделі «additive manufacturing evaporative casting» (AMEC) [8] (зокрема з дешевого полімеру PLA) на підкладці з ППС придатне для алюмінію, латуні, низьковуглецевої сталі, нержавіючої сталі, сірого та високоміцного чавуну. Очікується, що після повної розробки та комерціалізації процес AMEC для сталевих деталей

коштуватиме 3 USD за фунт. Хоча час для 3D-друку поверхневої оболонки залежить від розміру та геометрії деталі, після повної розробки деталей вагою 100 фунтів (близько 45 кг) можна буде виготовити менш ніж за 24 години, якщо файл STL уже існує [8].

3D-технології виготовлення разових моделей з мінімальними капіталовкладеннями усувають потреби в дорогій модельній оснастці і часто в автоматизованих лініях виготовлення моделей [3, 10]. Отримані за 3D-технологіями моделі повністю «вписуються» в відпрацьований десятиліттями процес ЛГМ, що є найбільш недорогим за вартістю впровадженням 3D-процесів в ливарне виробництво з його цифровою трансформацією, значним економічним ефектом і вирахом в часі освоєння нової номенклатури литва як при виробництві моделей для кінцевої металопродукції, так і моделей прес-форм (з наступним їх виливанням з алюмінію) для спікання серійних моделей з гранульованого ППС, що є найбільш поши-



а



б



в

Рис. 2.

Моделі і виливки з внутрішніми каналами: а — корпус трубно́ї арматури з сайту <https://www.china-castchem.com/>; б, в — виливки з цеху ФТІМС НАН України



Рис. 3.

Виливки за моделями з друкowanими полімерними деталями на ППС-підкладці: а — з зовнішньою оболонкою [8]; б — з накладками типу шестерні [9]

реним способом модельного виробництва для ЛГМ. Серійність виготовлення на 3D-фрезері моделей для товарних виливків, як правило, не перевищує сотні, для більшого їх випуску застосовують прес-форми [3]. Також поширюються способи 3D-друкування прес-форм (для виготовлення моделей з ППС) з термостійкого полімеру або алюмінію [4], що в 2—4 рази знижує вартість їх виготовлення порівняно з виготовленням за допомогою механічної обробки.

При вирізанні моделей механічною обробкою піноблоків ідеальною густиною ППС (EPS) є 0,016—0,024 г/см³ [3]. Якщо контроль за рівнем вуглецю в металі важливий, наприклад, для сталевого лиття, бажано використовувати Clearcast — це сополімер із ППС і поліметилметакрилату (PMMA). Якщо оброблений пінопласт не буде використано негайно, ливарним цехам рекомендується витримати його принаймні три тижні перед використанням. Щойно виготовлена піна може не мати стабільних розмірів через повільне випаровування вологи. Залежно від клімату, через три тижні, а можливо й раніше, розміри піни перестануть змінюватися [3]. Виготовлені легковагі моделі можна зберігати на складі місяцями та за потреби групувати [4].

Переходячи від CAD-проєктування деталі до САМ і механічної обробки ППС, важливо враховувати усадку металу, через відсутність деформації стінок ливарної форми коригувальний коефіцієнт, як правило, складає лише усадка металу [3]. Для таких сплавів, як алюміній з його високою усадкою при затвердінні, можна використовувати надливи (підживлювачі), або сама конструкція ливника може служити надливом. Для чавуну надливи зазвичай не використовуються. Для алюмінію та сталі застосовують надливи приблизно на одну третину менші від їх розміру для традиційних піщаних форм.

Одна з переваг того, що моделі з ППС можуть

мати дуже складні форми (як на рис. 2, а), полягає в тому, що піномоделі можна склеювати перед литтям. Це означає, що кілька деталей можна сконструювати так, щоб їх можна було з'єднати разом, а не обробляти чи видувати в одну готову прес-форму. Може бути нульовий ливарний уклон, змінний уклон, складні канали або глухі отвори. Можна навіть вилити з'єднані компоненти, такі як ланцюг, за умови, що вони мають окремі ливники. З'єднання деталей з ППС можна здійснити за допомогою таких матеріалів, як клей з органічним розчинником або стрічка скотч, але більшість ливарних виробництв використовують спеціальний клей типу Foam-Lok, що нагрівається (в тому числі в клейовому пістолеті), а потім швидко твердне при охолодженні. Густина клейового шва може сягати до 960 кг/м³ [3]. Необхідно використовувати мінімум клею, оскільки він буде виділяти надлишок газу, а також надлишок клею буде відображатись на виливку, тому краплі чи виступи на стиках потрібно відшліфувати.

В цьому огляді приділена значна увага опису виготовлення разових моделей, як одній з основних трудомістких і найбільш потенційно придатних для цифровізації і удосконалення складових ЛГМ, які не мають схожих операцій в інших ливарних процесах. Приклад конвеєра для подачі на формовку пофарбованих модельних блоків для серійного лиття алюмінієвих виливків в компанії Dongo Casting Srl, Італія, що заснована в 2020 р. для виробництва компонентів автомобільних двигунів, показано на рис. 4 [11].

Витрати на отримання моделі в середньому складають близько третини собівартості виливка. Інші операції ЛГМ-процесу мають схожість зі складовими ряду відомих процесів, що застосовуються в ливарних цехах. Нагадаємо, що послідовність операцій ЛГМ-процесу при виготовленні дрібних і середніх виливків

(зокрема крильчаток типу на рис. 2, в) виглядає згідно зі схемою (рис. 5).

Загалом при ЛГМ на 1 т литва витрачають практич-



Рис. 4. Конвеєр з модельними блоками, блок включає 4 моделі окремих виливків [11]

но лише 4 види модельно-формуєвальних матеріалів: кварцового піску — 50 кг, протипригарного покриття — 25 кг, плівки з поліетилену — 10 м², газифікується в ливарній формі 3,0—3,5 кг ППС, але з урахуванням відходів на виготовлення модельних комплектів нормою витрат вважають 6 кг ППС. Порівняємо це з витратами формуєвальних матеріалів при литті у фор-

ми з ХТС, які складають 3—4 т суміші на 1 т литва і включають не менше 3 % зв'язувального компонента, тобто мінімум 90 кг, а це приблизно в 30 раз більше від кількості газифікованого ППС у формі і свідчить про значно менші при ЛГМ як забруднення повітря від термодеструкції ППС у піску (що актуально з огляду прагнення до кліматично нейтрального виробництва), так і кількість твердих формуєвальних відходів ливарного виробництва. Це порівняння показує зменшення екологічно негативного впливу на навколишнє середовище при заміні процесом ЛГМ традиційних видів піщаної формовки для виготовлення виливків, особливо порівняно з застосуванням смоляних ХТС. Малі витрати формуєвального піску пояснюються його оборотним багатократним використанням з нескладним охолодженням та регенерацією, як правило, в прохідних конвеєрних установках.

Дільниці для формовки і заливання форм при ЛГМ займає відносно невеликі виробничі площі, типова лінія лиття з пінопласту зазвичай має довжину близько 30 м [4]. Приклад монтажу такої дільниці за проєктом компанії Vulcan Engineering Co. показано на рис. 6. Це компактний, як правило, автоматизований процес, який має можливість одностадковий потік. Однак деякі з найбільших у світі ливарних заводів змогли спроектувати та побудувати власні системи ЛГМ, які є досить простими, але ефективними.

Розглянемо приклади застосування ЛГМ в Китаї, як світового лідера з тоннажу випуску ливарної

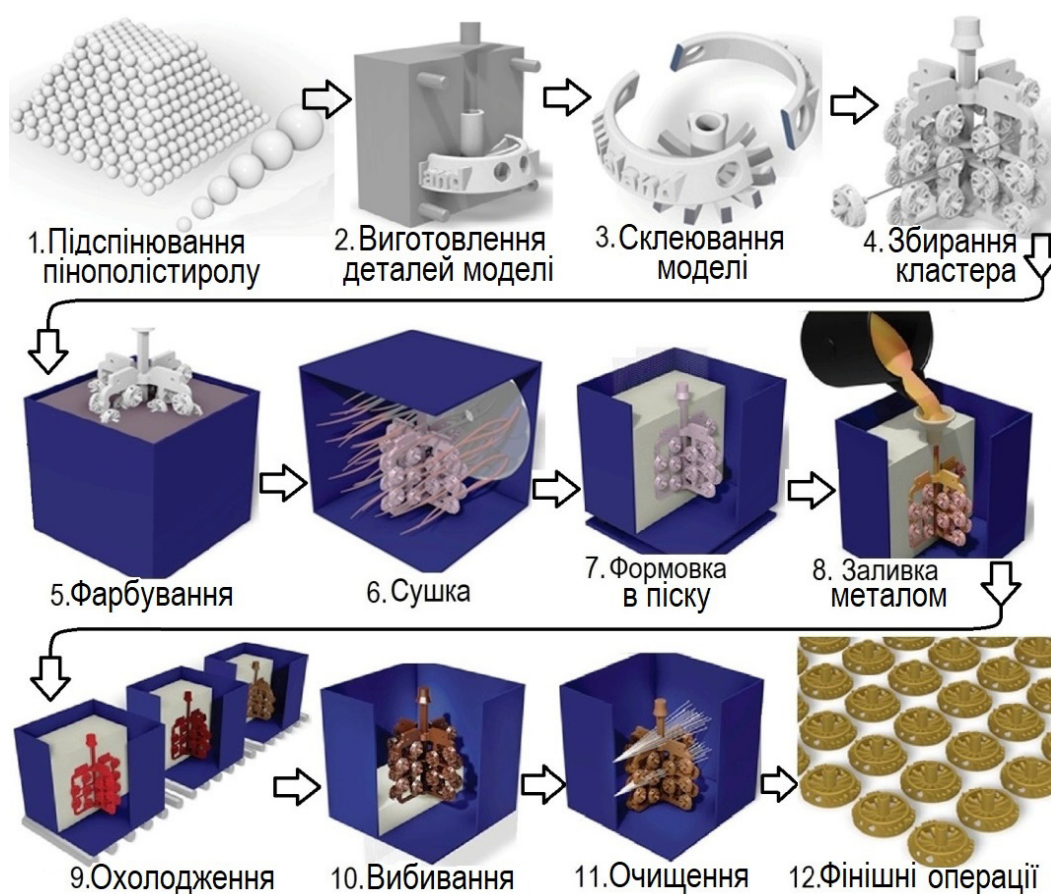


Рис. 5. Схема ЛГМ процесу для дрібних і середніх виливків [12]

продукції. У 2021 р. в Китаї було вироблено 54,05 млн т металевих виливків, що на 4,0 % більше ніж у 2020 р. і, по суті, складає близько половини виливків світу [13]. В технічних публікаціях відмічається, що спосіб ЛГМ має безліч переваг у порівнянні з традиційними технологіями лиття, тому в Китаї та за кордоном цей метод був проголошений ливарниками «Ливарною технологією XXI століття» [14].

У Китаї державою було підтримано розвиток технології ЛГМ, вона набула значного масштабу і стала важливою складовою ливарної промисловості, питома вага виробленої продукції ЛГМ в ливарній галузі зростає. ЛГМ стала однією з поширених новітніх технологій, що використовуються для модернізації традиційних ливарних заводів і організації нових [14], оскільки ця технологія порівняно низької капіталомісткості не мала патентних обмежень та опиралась на власне виготовлення досить нескладного обладнання і оснастки, що головним чином пов'язані з пересипанням і ущільненням дисперсних сухих матеріалів, які недорогі і розповсюджені в промисловості, а також на легку обробку ППС і

поширене обладнання для цього. За експертними оцінками об'єм випуску ливарної продукції методом ЛГМ в Китаї перевищує 4 %.

Нині технологію ЛГМ в Китаї використовують для виробництва виливків з таких сплавів: алюмінієвих, магнієвих, мідних; із сірого, високоміцного та спеціального чавунів (в тому числі чавуну з високим вмістом хрому, антифрикційного, зносостійкого, корозійностійкого чавунів); з вуглецевої сталі, середньо- і високовуглецевої низьколегованої антифрикційної сталі, спеціальної ливарної сталі (з великим вмістом марганцю та сталі корозійностійкої).

Типи виливків, що виготовляються [14]:

- антифрикційні виливки (дрібні кулі, підкладки з марганцевистої сталі, екскаваторні зуби, виливки з бейнітного чавуну тощо);
- вогнетривкі виливки (пічні колосники з жароміцної сталі та чавуну, термічні опалювальні піддони, корпуси та рами для різних матеріалів тощо);
- труби (з сірого чи високоміцного чавуну, а також з чавуну з високим вмістом алюмінію, фасонні частини труб);



Рис. 6.

Лінія ЛГМ, що має замкнутий цикл обігу контейнерних форм та опок з фільтрами для вакуумування піску [4]



Рис. 7.

Конвеєрні лінії ЛГМ з трьома бункерами для формовки сухим піском [15]

- клапани (клапани, в тому числі з високоміцного чавуну, штуцери зі сталі Ст25Л, Ст35Л);
- інженерні механічні деталі (шестерні, зубчасті рейки, деталі зі сталі для вилкових навантажувачів);
- корпуси (коробки передач, диференціалу, редуктора, блоку двигуна, пожежних колонок, корпусів боєприпасів тощо);
- виливки для гальмівної системи автомобілів (гальмівні апарати, гальмівні диски);
- колінчасті вали (компресора, автомобільного двигуна);
- колектори (впускні алюмінієві колектори, випускні з високоміцного чавуну для 4-циліндрових двигунів, із сірого чавуну для 6-циліндрового дизеля тощо);
- виливки заднього моста (корпус заднього моста зі сталі, високоміцного чавуну);
- виливки для залізниці та автопромисловості (залізнична рама зі сталі 25Л, балка надресорна, автомобільні ресорні кронштейни, огорожа швидкісних магістралей тощо);
- виливки головок циліндра компресора, одноциліндрового двигуна, циліндри та головки для 4-циліндрових автомобілів;
- виливки різного призначення (головки швейних машин, педалі, кронштейни, кривошипи сільгоспмашин, плужні різці та направляючі плуга тощо).

Асортимент виливків, так само, як і вага, значний. ЛГМ-процесу доступне литво від 50 г до 5 т. Основний матеріал у Китаї та Японії — це чавун, але останнім часом поширюється лиття сталі [14]. Швидкому нарощенню випуску литва сприяла поява цехів ЛГМ крупних і середніх виливків з типовими для Китаю конвеєрними лініями рядного розміщення контейнерів з габаритами більше 2 м (рис. 7) [15]. На таких конвеєрах під першим (з початку формовки) бункером в контейнер засипають піщану постіль, а під двома ближчими до центру цеха — засипають піском модель в контейнері з підняттям спеціальним механізмом його над рейками і віброущільненням піску. Для вакуумування піску форми до контейнерних опок ззовні приварені канали з сітчастими фільтрами, що газопроникні всередину порожнини контейнера. Нерідко в контейнерній формі заливають металом крізь 12—16 воронки і стояків стільки ж кушів чи кластерів моделей з ППС, що дозволяє досягти високої металоємності форми, недоступної для форм у парних опоках для традиційних видів лиття.

До перспектив розвитку ЛГМ, крім зазначених цифровізації при проектуванні виливків та виготовлення моделей за 3D-технологіями, відносяться нові різновиди процесів ЛГМ з регулюванням структури і властивостей литого металу при зовнішньому впливові на виливок у ливарній формі. Для інтенсифікації теплообміну в контактній зоні «метал — форма» у відділі проф. О.Й. Шинського розроблено введення газоподібних та рідких холодоагентів і пори піску форми, а також накладення високого механічного або газового ізостатичного тисків на рідкий і тверднучий метал [16, 17]. Холодоагенти в порах піску дозволяють регулювати передусім тепло-

акumuлюючи здатність піщаної форми і швидкість охолодження виливка, подібно діє тиск на метал, здрібнюючи кристаліти його структури і підвищуючи механічні властивості.

Крім того, в якості методу інтенсифікації теплообміну в контактній зоні «метал — форма» останніми роками розроблено способи руху піску навколо гарячого виливка після його тверднення у таких варіантах: 1) гравітаційне висипання піску з регульованою швидкістю крізь отвір контейнерної форми зі змінним розміром його вихідного отвору, а також 2) створення псевдозрідженого шару піску в ливарній формі шляхом продування повітря крізь дно контейнера (дослідження П.Б. Калюжного). В першому випадку досягається усунення пилоутворення за рахунок плавного опускання піску при більш швидкому охолодженні виливка і меншому нагріванні формувального піску, ніж в стоячому піску, одночасно з опустошенням контейнерної опоки. В другому випадку досягається висока швидкість охолодження виливка та можливе його гартування з гарячого стану безпосередньо у піщаній формі, в якій його вилито.

Підвищення розмірної точності литих конструкцій може бути досягнуто шляхом армування моделей з ППС металевими та неметалевими тілами, які одночасно є армуючою фазою і виконують функцію внутрішніх холодильників (дослідження І.А. Шалевської). Зниження шорсткості поверхні моделей і виливків забезпечується збільшенням густини ППС з одночасним «полегшенням» моделей утворенням в них орієнтованої пористості, а також виготовленням ППС-моделей (піномоделей) з повною чи частковою 3D-друкованою полімерною оболонкою [9] і внутрішніми каналами чи порожнинами, які одночасно служать для відводу газів з форми, усунення протитиску газів від моделі на метал і наступної нейтралізації цих газів [18].

Також на основі експериментів О.А. Яковишина розроблено спосіб виготовлення моделей з охолоджених в морозильній камері (кріообробка) гранул ППС перед їх спіканням в прес-формі, що збільшує їх потенціал до розширення і дозволяє як утворення легких моделей з густиною до 18...20 кг/м³, так і замішування до 50 % мелених відходів ППС з цими гранулами для виготовлення моделі в прес-формі. В першому випадку знижується газотвірність моделей, в другому — утилізуються відходи ППС. Крім арматури, матеріал моделі може включати інокулюючу дисперсну фазу. Дослідженнями І.А. Небожака показано, що при інокулюванні чавунів та алюмінієвих ливарних сплавів за допомогою дисперсно-наповненої ППС-моделі витрати модифікаторів та лігатур зменшуються в середньому на 25 %, проти модифікування чи легування чавунного розплаву у ковші, або композиційному зміцненні алюмінієвих ливарних сплавів шляхом подачі модифікатора на струмінь металу. При цьому передкристалізаційна обробка металу суттєво здрібнює кристалічне зерно та фазові складові виливка.

Висновки

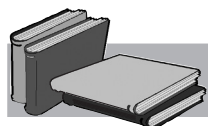
Для ливарних цехів ремонтного чи дрібносерійного лиття, яким необхідне швидке виготовлення ливарних моделей, метод ЛГМ сприяє мінімізації капітальних і поточних витрат при диверсифікації номенклатури виливків [3]. Процеси плавлення, лиття та обробки виливків при ЛГМ практично такі ж, як і в типових ливарних процесах, за винятком потреби в вищій температурі заливки форм на 30—50 °С. Процес виготовлення моделей з ППС, незважаючи на свою специфічність, має декілька варіантів [7], початково може бути реалізований в невеликих масштабах для отримання пробних виливків. Існуюче ливарне підприємство після проведення успішних випробувань зі спрощеним процесом ЛГМ може збільшити розміри партій виливків разом з розширенням інвестицій в оснастку та обладнання для цього. Механічна обробка при отриманні піномodelей з точки зору вартості вигідна для обсягів менше 100 виливків [3], а для серії понад 1000 виливків (поширене використання ЛГМ) застосовують спікання гранульованого ППС в прес-формах, включно з застосуванням для цього автоматизованого обладнання, аналогічного для виготовлення упаковки з ППС. За кількістю твердих і газоподібних відходів ЛГМ в формах з сухим вакуумованим піском екологічно переважає більшість ливарних процесів і має відносно низький рівень викидів CO₂.

Процес ЛГМ постійно розвивається і вдосконалюється, легко включає в низку своїх операцій 3D-технології та піддається цифровізації, автоматизації, роботизації і масштабуванню, відноситься до високоточного лиття в піщані форми з застосуванням некапіталомісткого обладнання. Приклад Китаю показує можливість швидкого збільшення випуску виливків в широкому діапазоні їх ваги, номенклатури і виду застосовуваних металевих сплавів.

В нових перспективних різновидах ЛГМ застосовують такі раніше не розкриті потенційні можливості: як сипкість сухого піску форми — для створення конвекційного охолоджувального середовища для виливка; вакуум у ливарній формі — для примусової фільтрації в пори піску плинних холодоагентів; сипкість гранул ППС для розміщення в тілі моделі армуючої, легуючої чи інокулюючої макро- чи мікро-

фаз; кріообробку для регулювання густини моделі тощо; проектування та виготовлення моделі не лише як газотвірної, а водночас і як газопровідної конструкції для зниження тиску газів на метал, що заливається у форму, виводу за межі форми надлишку газів і їх знешкодження. Загалом, науково-фаховий підхід до ЛГМ-процесу за методикою проф. О.Й. Шинського [16, 17] окреслює його фізико-хімію, газогідро- і термодинаміку як взаємодію основних потоків трьох середовищ: сипкого твердого (сухий пісок та гранульований ППС), рідкого (розплав металу, рідка фаза термодеструкції ППС) та газоподібного (продукти газифікації моделі, газове середовище у порах вакуумованого піску і у вакуумній системі, газове середовище при охолодженні піску в потоці, при його пневмотранспортуванні, в повітрі цеху з урахуванням дії вентиляційної та очисної систем).

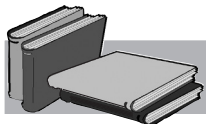
Оптимізація передусім термо-динамічної взаємодії цих потоків направлена на випуск якісної металопродукції з конкурентоспроможною собівартістю і нейтральним до навколишнього середовища виробництвом. Також до цих потоків в підрозділі виробництва піномodelей додається новітній потік «цифро-фізичного перетворення» (digital-to-physical conversion) [19], а саме: перетворення методами 3D-технологій від цифрового (креслення на комп'ютері) до фізичного, матеріального виробу — піномodelі.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. Свириденко Ю.А. Як буде відновлюватися Україна? 21.04.2022. URL: <https://www.pravda.com.ua/columns/2022/04/21/7341214/> (дата звернення: 10.07.2023).
2. Україна ставить за мету за десять років наростити доларовий ВВП у 6,2 рази. 21.06.2023. URL: <https://interfax.com.ua/news/economic/918105.html> (дата звернення: 10.07.2023).
3. Jordan S., Debruin M. How a foundry can diversify into lost foam casting at negligible cost. *Modern Casting*. 2022. August. P. 29—33. URL: <https://www.moderncasting.com/articles/2022/08/09/how-foundry-can-diversify-lost-foam-casting-negligible-cost> (дата звернення: 10.07.2023).
4. Miller M. Why Lost Foam? *Modern Casting*. August 11, 2020. No. 8. P. 41—42. URL: <https://www.moderncasting.com/articles/2020/08/11/why-lost-foam> (дата звернення: 10.07.2023).

5. Omidiji B.V. Evaporative Pattern Casting (EPC) Process. In book: *Advanced Casting Technologies*. May 2nd. 2018. P. 87—107. <https://dx.doi.org/10.5772/intechopen.73526>
6. Jordan S.E., Debruin M.E., Cinkilic E., Luo A.A. Thin-Walled Ductile Iron. *Casting source*. 2021. Sept/Oct. P. 34—39.
7. Дорошенко В.С., Шинський І.О. 3D-технології при литві по газифікуємим моделям. *Метал та лиття України*. 2009. № 4—5. С. 30—33.
8. Jordan S. Additive Manufacturing Evaporative Casting. Jun 26, 2019. URL: <https://contest.techbriefs.com/2019/entries/manufacturing-robotics-automation/9764> (дата звернення: 10.07.2023).
9. Калюжний П.Б., Дорошенко В.С., Нейма О.В. Лиття за комбінованими полімерними моделями, що газифікуються. *Процеси лиття*. 2023. № 2 (152). С. 49—55. <https://doi.org/10.15407/plit2023.02.049>
10. Шинський О.Й., Шалевська І.А., Дорошенко В.С. Комплектація цеху лиття металу за моделями, що газифікуються, сучасним 3D-технологічним обладнанням. *Метал та лиття України*. 2023. № 1 (332). С. 57—62. <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.01.057>
11. Begnis R. Dongo casting: digital transformation as a strategic lever to face and win the challenges of the e-mobility market. 21 Jun. 2021. URL: <https://trans4mers.eu/blog/post/40> (дата звернення: 10.07.2023).
12. Дорошенко В.С., Кравченко В.П. Передумови створення цифрового двійника технологічного процесу лиття за моделями, що газифікуються, за даними моніторингу ливарного цеху. *Процеси лиття*. 2020. № 4 (142). С. 42—52. <https://doi.org/10.15407/plit2020.04.042>
13. Industry Outlook: Sales Expected to Keep Growing. *Modern Casting*. January 2023. P. 33—35.
14. Галкин А.А. Опыт освоения производства отливок методом лития по газифицируемым моделям с использованием оборудования и материалов из КНР. *Литейщик России*. 2012. № 12. С. 17—19.
15. Lost Foam Machine Supplier in China. URL: <https://kitairu.net/rubber-and-plastics/machinery-and-parts/metal-processing-machinery/metal-casting-machinery/709022.html#prettyPhoto> (дата звернення: 10.07.2023).
16. Шинський О.Й., Шалевська І.А., Шинський В.О., Калюжний П.Б., Шевчук Т.В., Лисенко Т.В., Слюсарев В.А., Погребач Є.В., Коломійцев С.В. Принципи побудови та ідентифікації багаторівневої системи контролю параметрів технологічного циклу одержання литих конструкцій. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 5/1. С. 25—32.
17. Шинський О.И., Дорошенко В.С. Процессы песчаной формовки с использованием градиентов давления, температуры и концентрации реагентов в формовочной смеси. *Процессы лития*. 2017. № 5. С. 56—65.
18. Дорошенко В.С. Знешкодження газів, які виділяються при литті за моделями, що газифікуються. *Метал та лиття України*. 2021. № 2 (325). С. 60—67. <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.02.060>
19. Industry 4.0: How to navigate digitization of the manufacturing sector. McKinsey Digital. 2015. https://www.mckinsey.de/files/mck_industry_40_report.pdf (дата звернення: 10.07.2023).

Надійшла 13.07.2023



REFERENCES

1. Svyridenko, Yu.A. (2022). How will Ukraine recover? 21.04.2022. URL: <https://www.pravda.com.ua/columns/2022/04/21/7341214/> (last accessed 10.07.2023) [in Ukrainian].
2. Ukraine aims to increase the dollar GDP by 6.2 times in ten years. 21.06.2023. URL: <https://interfax.com.ua/news/economic/918105.html> (last accessed 10.07.2023) [in Ukrainian].
3. Jordan, S., Debruin, M. (2022). How a foundry can diversify into lost foam casting at negligible cost. *Modern Casting*. 2022. August, 29—33. URL: <https://www.moderncasting.com/articles/2022/08/09/how-foundry-can-diversify-lost-foam-casting-negligible-cost> (last accessed 10.07.2023).
4. Miller, M. (2020). Why Lost Foam? *Modern Casting*. (8), 41—42. URL: <https://www.moderncasting.com/articles/2020/08/11/why-lost-foam> (last accessed 10.07.2023).
5. Omidiji, B.V. (2018). Evaporative Pattern Casting (EPC) Process. In book: *Advanced Casting Technologies*, 87—107. <https://dx.doi.org/10.5772/intechopen.73526>
6. Jordan, S.E., Debruin, M.E., Cinkilic, E., Luo, A.A. (2021). Thin-Walled Ductile Iron. *Casting source*. Sept/Oct., 34—39.
7. Doroshenko, V.S., Shinsky, I.O. (2009). 3D-technologies of Lost Foam Process. *Metal and Casting of Ukraine*, (4—5), 30—33 [in Russian].
8. Jordan, S. (2019). Additive Manufacturing Evaporative Casting. URL: <https://contest.techbriefs.com/2019/entries/manufacturing-robotics-automation/9764> (last accessed 10.07.2023).
9. Kaliuzhnyi, P.B., Doroshenko, V.S., Neima, O.V. (2023). Casting of combined polymer patterns that are gasified. *Casting processes*, 2(152), 49—55. <https://doi.org/10.15407/plit2023.02.049> [in Ukrainian].
10. Shinsky, O.Y., Shalevska, I.A., Doroshenko, V.S. (2023). Complete set with modern 3D technological equipment of foundry using the Lost Foam Casting process. *Metal and Casting of Ukraine*, 1(332), 57—62. <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.01.057> [in Ukrainian].
11. Begnis, R. (2021). Dongo casting: digital transformation as a strategic lever to face and win the challenges of the e-mobility market. URL: <https://trans4mers.eu/blog/post/40> (last accessed 10.07.2023).

12. Doroshenko, V.S., Kravchenko, V.P. (2020). Prerequisites for Creating a Digital Twin of the Technological LFC-Process, According to the Monitoring of the Foundry. *Casting processes*, 4(142), 42—52. <https://doi.org/10.15407/plit2020.04.042> [in Ukrainian].
13. Industry Outlook: Sales Expected to Keep Growing. *Modern Casting*. January 2023, 33—35.
14. Galkin, A.A. (2012). Experience in mastering the production of castings by casting according to gasified models using equipment and materials from PRC. *Liteyshchik Rossii*, 12, 17—19 [in Russian].
15. Lost Foam Machine Supplier in China. URL: <https://kitairu.net/rubber-and-plastics/machinery-and-parts/metal-processing-machinery/metal-casting-machinery/709022.html#prettyPhoto> (last accessed 10.07.2023).
16. Shinsky, O.Y., Shalevska, I.A., Shinsky, V.O., Kaliuzhnyi, P.B., Shevchuk, T.V., Lysenko, T.V., Slyusarev, V.A., Pogrebtach, E.V., Kolomyitsev, S.V. (2018). Principles of construction and identification of a multilevel system of control of parameters of the technological cycle for obtaining flex structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, (5/1), 25—32 [in Ukrainian].
17. Shinsky, O.I., Doroshenko, V.S. (2017). Sand molding processes using gradients of pressure, temperature and concentration of reagents in the sand. *Casting processes*, 5, 56—65 [in Russian].
18. Doroshenko, V.S. (2021). Disposal of gases emitted during Lost Foam casting process. *Metal and Casting of Ukraine*, 2(325), 60—67. <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.02.060> [in Ukrainian].
19. Industry 4.0: How to navigate digitization of the manufacturing sector. McKinsey Digital (2015). https://www.mckinsey.de/files/mck_industry_40_report.pdf (last accessed 10.07.2023).

Received 13.07.2023

Summary

V.O. Shinsky, Research Scientist, e-mail: shynskyvo@nas.gov.ua,
<https://orcid.org/0000-0001-5033-1199>

V.S. Doroshenko, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Leading
 Researcher, e-mail: doro55v@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0002-0070-5663>

S.I. Klymenko, PhD (Engin.), Senior Research Scientist, e-mail:
ukrdeplit15@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2431-451X>

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

The current state and prospects for the development of the Lost Foam Casting process

Increasing the capacity of foundry production can play a decisive role in the recovery of the machine-building and defense sectors of the Ukrainian industry. The current state and prospects for the development of foundry technology — Lost Foam Casting (LFC) process, as well as its possibilities for increasing the volume of metal processing into finished parts on the example of China, are considered. For foundries of low-volume casting, which need fast production of foundry patterns, the LFC method contributes to the minimization of capital and current costs. The melting, casting and finishing processes in LFC are the same as in typical foundry processes, with the exception of the need for a 30—50 °C higher pour temperature. The process of making patterns from polystyrene foam (EPS) has been developed in several variants and can initially be implemented on a small scale to obtain trial castings. An existing foundry, after successful trials with a simplified LFC process, can increase batch sizes of castings along with increased investment in tooling and equipment to do so. Mechanical processing when obtaining foam patterns is beneficial for volumes of less than 100 castings, and for a series of more than 1000 castings (common use of LFC) sintering of granulated EPS in molds is used, including the use of automated equipment for this. In terms of the amount of solid and gaseous waste, LFC in forms with dry vacuumed sand is ecologically superior to most foundry processes. The LFC process is constantly developing and improving, easily includes 3D technologies in the sequence of its operations and is amenable to digitization, automation, robotization and scaling, refers to high-precision casting in sand molds using non-capital-intensive equipment. The example of China shows the possibility of a rapid increase in the production of castings in a wide range of their weight, nomenclature and type of used metal alloys.

Keywords

Lost Foam Casting; 3D technologies; 3D printing; disposable pattern; foundry; restoration of Ukrainian industry.