

Володимир Дорошенко*

Доктор технічних наук, провідний науковий співробітник
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України
03142, бульв. Вернадського, 34/1, м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-0070-5663>

Олександр Янченко

Кандидат технічних наук, доцент
Вінницький національний технічний університет
21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-3888-3772>

Приклад ливарної технології виробництва широкої номенклатури металоконструкцій для подальшого масштабування в процесі розбудови машинобудування

Анотація. З огляду перспектив розбудови українського машинобудування розглянуто тип виробництва металопродукції і діючий приклад його реалізації, які рекомендуються для масштабування. Виробництво металовиробів широкої номенклатури і різної серійності показано на прикладі невеликого ливарного цеху, що працює за технологією лиття металу за газифікованими моделями (ЛГМ). Аналіз виробничої практики експлуатації цієї технології виконано з метою її масштабування і мотивування підприємств та інженерних установ до її активного впровадження, що сприятиме відродженню українського машинобудування, підвищенню рівня інноваційності в економіці та забезпеченню її конкурентоспроможності на міжнародному рівні. Показано зразки продукції ливарного цеху, проаналізовано особливості та переваги ЛГМ-технології, невисокі інвестиційні потреби організації такого цеху завдяки можливості виготовлення більшості обладнання та оснастки для нього українськими підприємствами. Міцність ливарної піщаної форми при ЛГМ зумовлена інноваційним застосуванням передусім законів фізики за рахунок унікального створення в стінках форми градієнта газового тиску від випаровування разової ливарної моделі з пінополімеру разом з вакуумуванням піску форми. Це дає змогу виготовляти ливарні форми з сухого кварцового піску при обтіканні ним модельних конструкцій різноманітної геометричної конфігурації за допомогою методу віброущільнення, забезпечуючи багаторазовий обіг цього піску. Відмічено перспективи цифровізації ЛГМ-процесу з акцентом на 3D-друк ливарних моделей що нерідко на порядок скорочує час від креслення конструкції до її виготовлення в металі. Послідовність операцій при ЛГМ зображено ескізною схемою. Структуру впливу основних технологічних параметрів ЛГМ на якість виливків показано за допомогою діаграми Ішікави, на якій окремі фактори позначено з урахуванням останніх досліджень та значного досвіду удосконалення ЛГМ-процесу науковцями ФТІМС НАН України. Виконане дослідження може стати основою для створення промислових осередків росту на етапі відновлення машинобудування, а також для розробки стратегій модернізації ливарних процесів, впровадження нових технологій і підвищення рівня автоматизації. У підсумку, це сприятиме підвищенню економічної стійкості та створенню нових можливостей для зростання промислового сектора країни

Ключові слова: дрібносерійне виробництво; ливарний цех; піщана форма; лиття за газифікованими моделями; розвиток машинобудування, номенклатура продукції

Suggested Citation:

Doroshenko, V., & Yanchenko, O. (2024). An example of foundry technology for the production of a wide range of metal structures for further scaling in the process of developing mechanical engineering. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 10(2), 11-20. doi: 10.63341/vjmet/2.2024.11.

*Corresponding author



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Вступ

В умовах воєнних дій українське машинобудування стикається зі складними викликами: руйнація виробничих потужностей і транспортної інфраструктури призводить до знищення промислового потенціалу, що має негативні наслідки для стійкості та конкурентоспроможності країни. Зважаючи на військово-політичні ризики, триваючою у світі цифровізацію, екологічні та технологічні тренди, а також потребу в соціально відповідальних бізнес-моделях, модернізація українського машинобудування є невідкладною. Стратегічне значення для розвитку машинобудування в Україні в сучасних умовах має ливарне виробництво з випуску широкого асортименту металопродукції. Його розвиток є важливим як для забезпечення обороноздатності країни, так і для її повоєнного відновлення, оскільки ці процеси потребують великої кількості різноманітних металевих виробів. З огляду на це особливого значення набувають ливарні технології, здатні легко перелаштовуватися для випуску широкої номенклатури продукції і які можуть бути застосовані як на малих, так і на великих підприємствах, що дасть змогу швидко реагувати на зміни потреб оборони й економіки. Крім того, перспективним напрямом розвитку машинобудування є масштабування малих діючих виробництв, які вже використовують ресурсоефективні, відпрацьовані гнучкі технології. Менші, але стабільні підприємства з широким асортиментом продукції та оптимізованими процесами, можуть стати осередками їх поступового розширення до середніх і великих виробництв.

Машинобудівна промисловість в Україні є стратегічно важливою галуззю для підтримки обороноздатності країни, її технологічного та інноваційного розвитку, долучення до глобальних ланцюгів створення продукції (Sobkevich, 2024). З 2016 року триває зниження об'єму продукції українського машинобудування та металообробки (Ishchuk, 2022), які в сучасному світі невинно трансформуються, насичуючись інформаційними технологіями. В глобальному плані ці галузі відіграють ключову роль у розвитку економіки та технологічного прогресу для створення та подальшої реалізації інновацій товарних, технічних і технологічних категорій. В умовах воєнних дій українське машинобудування стикається з серйозними проблемами, які обмежують реалізацію його виробничого потенціалу. Руйнація виробничих потужностей і транспортної інфраструктури призводить до втрати значної частини промислового потенціалу, що перевищує 30 % (Kushnirenko & Gakhovich, 2023). Відновлення українського машинобудування в умовах післявоєнної невизначеності потребує комплексного підходу, що базується на європейських принципах (Bilopolskyi, et al., 2024), інтеграції екологічно сталих технологій і цифрових рішень у всі етапи виробництва для підвищення його ефективності та стійкості. Для успішного відродження галузі необхідні

реконструктивні заходи, спрямовані на регіональну диверсифікацію (Feier et al., 2023), що дозволить знизити залежність від окремих економічних центрів. Розширення середньо- і високотехнологічного виробництва сприятиме підвищенню конкурентоспроможності української промисловості та створенню сучасних промислових комплексів, орієнтованих на задоволення як внутрішніх, так і зовнішніх ринкових потреб. Модернізація повинна відповідати вимогам національної безпеки. Формування самодостатнього комплексу галузей стане важливим кроком до підвищення стійкості економіки, дозволяючи ефективніше реагувати на соціально-економічні та воєнно-політичні виклики, забезпечуючи надійну підтримку промислового потенціалу країни (Kushnirenko & Gakhovich, 2023). Українські інженерні школи (Unite engineering schools..., 2024) володіють ресурсоефективними технологіями, які залишаються недостатньо поширеними через брак інформації, експертних знань або інфраструктури для їх реалізації. Водночас відсутність обґрунтованих стратегічних ініціатив зі сприяння удосконалення та адаптації українського машинобудування до глобальних викликів майбутнього (військово-політичних, цифрових, фінансових, інвестиційних, екологічних, технологічних, соціальних тощо) нарощує розрив між Україною та розвинутими країнами світу й тільки посилює ефект деіндустріалізації економіки країни.

Метою цього дослідження був опис прикладу ливарного виробництва широкої номенклатури металовиробів на основі технології лиття металу за газифікованими моделями, розкриття потенційних напрямів відновлення машинобудування в країні шляхом застосування таких технологій і досвіду діючих українських підприємств та наукових установ.

Матеріали і методи

Дослідження проведено в 2023–24 рр. на базі діючого дослідно-експериментального ливарного цеху Фізико-технологічного інституту металів і сплавів НАН України (м. Київ), обладнаного українським устаткуванням модульного типу, що дозволяє з гнучкістю налаштовувати виробничі лінії та зберігати мобільність в умовах обмежених площ. Обладнання модульного типу складається з серійно чи нестандартно виготовлених одиниць чи установок невисоких капіталоемності та маси, що дозволяє переставляти його, комплектуючи з нього виробничі лінії у значній мірі довільної конфігурації. Цех виготовляє передусім ремонтні деталі та навісні органи сільськогосподарської ґрунтообробної, землерийної, будівельної та гірничодобувної техніки. Основне призначення цеху полягає в відпрацюванні виробничих процесів для подальшого поширення таких рішень у вітчизняному машинобудуванні.

В основі методології дослідження лежали методи огляду, систематизації та аналізу науково-технічної і

економічної інформації, що дало змогу отримати цілісне уявлення про стан та перспективи розвитку ливарних технологій. Була проведена систематизація інформації, підкріплена фотографіями моделей типових виливків і ключових операцій, що виконуються у цеху. Це допомогло структурувати знання про виробничі операції. Для виявлення ключових тенденцій і закономірностей ливарного процесу, що являє собою лиття металу за моделями, що газифікуються і має поширену аббревіатуру «ЛГМ», наведено схему послідовно виконуваних технологічних операцій виробництва металопродукції. Суть технології ЛГМ полягає в засипанні піском в контейнері пінополістирольної моделі виливка, заливанні розплавом металу цієї моделі, яка випаровується і заміщається металом, після твердіння якого утворюється виливок, що повторює конфігурацію моделі. Серед досліджуваних аспектів – гнучкість модульного обладнання, яке може розміщуватися в різних конфігураціях, зокрема поза межами цеху, що оптимізує виробничі лінії.

Для дослідження структури ливарного процесу стосовно впливу основних технологічних параметрів на якість продукції та для оцінки масиву такої інформації в його кількісному і якісному складі застосовано діаграму за методом Ішікави (Ishikawa, 1985). Цей графічний метод дослідження та визначення найбільш суттєвих причинно-наслідкових взаємозв'язків між факторами та наслідками у досліджуваній проблемі дозволяє систематично визначити і візуалізувати основні фактори, які впливають на якість продукції, та встановити контрольовані зв'язки між ними. Діаграма допомогла виявити критичні фактори, що потребують оптимізації, але й розробити цілеспрямовані стратегії для покращення якості та стабільності процесу виробництва. Послідовність складання діаграми ішла від операцій підготовки (рециклінгу) вихідних чи оборотних матеріалів та налаштування обладнання і оснастки до операцій регулювання факторів виготовлення ливарної форми, плавки, обробки в рідкому стані металу та заливання його в ливарну форму. Базуючись на працях О.У. Shinsky *et al.* (2018) і S. Kumar *et al.* (2007), діаграма Ішікави була розширена, щоб відобразити додаткові технологічні можливості процесу ЛГМ та забезпечити повну картину факторів впливу на кінцевий продукт.

Таким чином, методологія дослідження базувалася на аналізі й візуалізації технологічного процесу, що дозволило встановити контрольовані зв'язки між виробничими факторами та якістю продукції, а також сформулювати підхід до вдосконалення й оптимізації ливарного процесу в умовах сучасного машинобудування України.

Результати та обговорення

В цій статті розглянуто приклад ливарної технології для виробництва широкої номенклатури металопродукції

як одне з джерел відновлення українського машинобудування, яке відносять до однієї з найбільш трудомістких і наукомістких галузей промисловості. Ця технологія придатна для початкових та невеликих виробництв, а також успішно застосовується на великих заводах (зокрема, що поширені в Китаї), розвиток потужностей яких збільшить потенціал зростання всього виробничого комплексу країни. Можливість почати з дрібносерійного виробництва металопродукції в невеликому обсязі зменшує фінансові ризики та дає можливість випробувати нові ідеї, технологічні тонкощі та продукцію на ринку. Такий підхід сприятиме розростанню локального виробництва (зокрема ремонтних запчастин), місцевої економіки, створенню нових робочих місць, розвитку професійних навичок працівників. Крім того, цей підхід може допомогти залученню інвестицій, стимулюючи подальший розвиток машинобудування.

Зокрема, дрібносерійне виробництво малих і середніх підприємств широкого товарного асортименту дозволяє оперативно реагувати на потреби ринку, забезпечуючи достатню якість продукції при невеликих обсягах виробництва. Його перевагами є: гнучкість (можливість швидко змінювати асортимент продукції, адаптуючись до змін попиту); полегшене впровадження нових технологій та інновацій у виробничий процес; уважність до деталей, що підвищує якість продукції завдяки меншому обсягу виробництва; оптимізація витрат на виробництво шляхом використання наявного обладнання та меншої кількості матеріалів.

До ключових факторів сприяння успішності дрібносерійного виробництва належать:

- ◆ модульні виробничі системи, які можна швидко переналаштувати під різні продукти, та технології з можливістю рознесення створюваних напівпродуктів та оснащення по різних приміщеннях, виробничих дільницях і без короткого терміну використання;

- ◆ обладнання невисокої капіталоемності, плинні сировинні та технологічні матеріали, бажано з високим ступенем повторного циклічного використання (для екологічної стійкості і оптимальної ресурсомісткості) та невеликої густини;

- ◆ нескладність автоматизації виробництва, впровадження адитивних технологій (3D-друку) для швидкого створення прототипів (зі скороченням часу виходу на ринок) і невеликих серій металовиробів;

- ◆ сприятливість до інтеграції з цифровими технологіями для моделювання, проектування та оптимізації виробничих процесів.

Діюче, хоч і невелике виробництво більш привабливе для інвестицій з метою його розширення в процесі відбудови промисловості країни, ніж створюване з нуля. Таким чином, виробництво металопродукції з технологією, придатною до різної серійності і широкого спектру виробів як за їх геометрією, габаритами, так і за масою, може стати ефективним інструментом для

відродження машинобудування, забезпечуючи його конкурентоспроможність та сталий розвиток.

Огляд і структурування ливарної технології на прикладі діючого ливарного цеху

Ключову роль у машинобудуванні відіграє ливарне виробництво як його основна заготівельна база, оскільки не менше половини промислової металопродукції складається з деталей та вузлів, виготовлених саме ливарними методами. Ливарне виробництво постачає продукцію з різних металів та сплавів для машин і механізмів, транспортної індустрії, енергетики, ВПК тощо, виготовляючи складні за геометричною конфігурацією і конструкцією деталі, які було б складно або неможливо виготовити іншими способами.

Створення виробництва металевих виливків в дослідно-промисловому цеху ФТІМС НАН України продуктивністю до 40 т на місяць, як здебільшого дрібносерійного та ремонтного виготовлення литва, є прикладом диверсифікації випуску продукції як за масою виробу (від 0,2 до 1100 кг), металевими сплавами (чорні та кольорові), так і за серійністю продукції. Таку варіативність виробництва досягнуто завдяки впровадженню в цеху технології лиття газифікованих моделей (ЛГМ, Lost Foam Casting), яка відповідає практично всім наведеним вище показникам для успішного виробництва металовиробів значних діапазонів серійності і номенклатури (Shinsky *et al.*, 2018).

В жодній ливарній технології, крім ЛГМ, метал не заливається в ливарну форму, порожнина якої заповнена твердим матеріалом, що є унікальною особливістю ЛГМ. Якщо типова ливарна порожнинна піщана форма під час заливання металу є носієм функції утримання і перенесення на метал геометрії (конфігурації) майбутнього виливка, то при ЛГМ ці функції виконує разова ливарна модель. В першому випадку міцність стінки форми зумовлена адгезійно-когезійними силами (з огляду фізико-хімії) між зернами формувального піску зі зв'язувальним компонентом, а в другому – градієнтом газового тиску завдяки різниці тиску в вакуумованому пористому середовищі сухого формувального піску і тиску газів від термодеструкції моделі, яка служить рухомих джерелом газовиділення по мірі заміщення її розплавом металу. Це дало перевагу по екологічності: застосування меншої кількості хімічних речовин знижує негативний вплив на довкілля.

Застосування ливарних форм з сухого піску багаторазового обігу (без зв'язувальних компонентів) дозволяє без капіталоемного масивного обладнання (порівняно з типовими формувальними машинами пресування чи струшування) регулювати виробництво як за строками (з накопиченням разових моделей певних виливків протягом часу ажно місяця і більше), за металоемністю форми, розміщуючи від 1 до 20 модельних

кущів чи кластерів з окремими стояками в одній контейнерній піщаній формі, так і за локацією виробничих дільниць, з можливістю винесення модельної дільниці в прибудові до цеху на поверхи вище першого чи в окремій приміщенні легкої конструкції.

Циклічний обіг і охолодження формувального піску можливо проводити і поза цехом вздовж зовнішньої його стіни, що реалізовано обладнанням модульного типу в цеху ФТІМС НАН України. Одиниці обладнання виступають як модулі, що дозволяють їх оптимально комплектувати в технологічні лінії згідно виробничих чи транспортних потоків. Об'ємна комплектація ливарних моделей з пінополістиролу (ППС) у кластери чи кущі і застосування багатомісних ливарних форм (з окремими ливарними стояками для кожного куща моделей) суттєво економлять виробничі площі (на тонну продукції) для заливання і вистоювання форм в процесі охолодження виливків або скорочують ливарні конвеєри порівняно з литтям у більш поширені традиційні форми в парних опоках. Застосування сухого піску для ливарних форм полегшує циклічний обіг піску, для чого застосовують обладнання практично аналогічне до типового для заводу підготовки будматеріалів, і яке нескладно комплектувати з окремих установок-модулів і виготовити в більшості українських механічних цехів.

Останні розробки інституту ФТІМС НАН України щодо моделювання біонічних литих конструкцій з ППС, аналогічно описаним в роботі (Cheiliakh & Cheiliakh, 2020), регулювання швидкості охолодження литва у піщаній формі, включно з варіантами його термообробки (Doroshenko & Kalyuzhny, 2024) суттєво удосконалюють ЛГМ-процес. А застосування 3D-фрезерів та 3D-принтерів для виготовлення моделей, в тому числі з вентиляцією моделей і знешкодженням викидів газів (Doroshenko, 2021) відкриває можливості комп'ютеризації, автоматизації модельного виробництва і, загалом, поліпшення екологічної безпеки ЛГМ-процесу одночасно зі збільшенням перспективних варіантів виготовлення легкових тонкостінних виливків (Jordan *et al.*, 2021) складної геометрії.

Тривала виробнича практика показала вигідне застосування технології ЛГМ для ремонтного литва, зокрема для виробництва достатньо швидкозношуваних навісних робочих органів ґрунтообробного обладнання сільськогосподарського призначення, приклади яких показано на Рисунку 1. Виробництво таких деталей відноситься до важливого напрямку, яким є аграрне машинобудування. Послідовна реалізація аграрної реформи збільшуватиме попит на сільськогосподарські машини й устаткування – як у великих, так і у дрібних господарств, що, в свою чергу, стимулюватиме використання ними навісних робочих органів, що в екстремальних умовах контактують з ґрунтом, зношуються, після чого потребують регулярної заміни (Askerov, 2021).

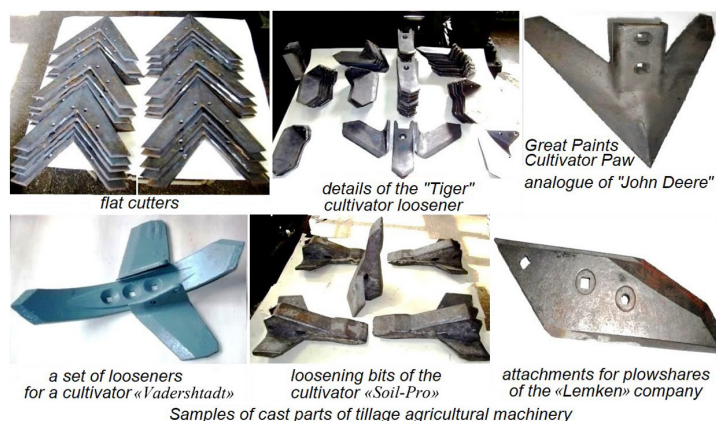


Рисунок 1. Зразки литих навесних деталей ґрунтообробної сільгосптехніки

Джерело: фото M.G. Askerov (2021)

На Рисунок 2 показано структурну схему найбільш поширених технологічних операцій ЛГМ-процесу для виробництва дрібних і середніх виливків. Процес підготовки ППС та виготовлення з нього моделей, як легкогазних матеріалів і виробів не потребує масивного обладнання. Для транспортування гранул ППС доступний

пневмотранспорт по полімерних трубопроводах. А транспортування і складування моделей неважко виконувати вручну навіть у стопках чи в складі кластерів (позиція 4). На позиції 7 заливання металу і наступного тверднення виливка, як правило, застосовують вакуумування піску форми.

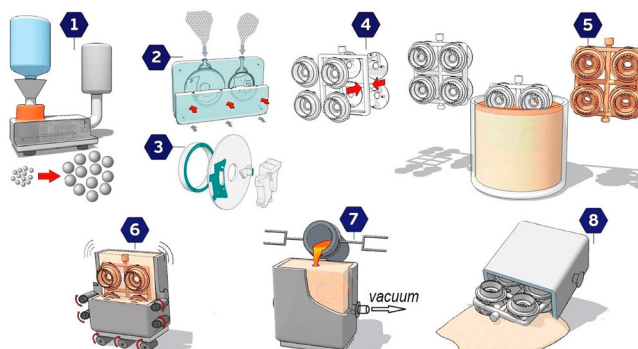


Рисунок 2. Типова схема ЛГМ-процесу

Примітки: 1 – підспіювання гранул ППС; 2 – отримання з цих гранул деталей моделі; 3 – склеювання деталей моделі; 4 – збирання модельних кластерів (кущів); 5 – фарбування кластерів зануренням; 6 – формування кластерів в контейнері з сухим піском і його вібрацією; 7 – заливання форми металом; 8 – охолодження виливка і висипання піску і виливка з контейнера

Джерело: Densen Group (2020)

Приклади підготовлених до заливання ливарних контейнерних форм різного розміру і металоемності, а також процес їх заливання металом в цеху ЛГМ ФТІМС НАН України показано на Рисунок 3. Піщані контейнерні форми встановлюють на горизонтально замкненому рольганговому конвеєрі (3а), обладнаному з електроприводом, або на заливальному плаці (3б). Заливання форм металом (3с) в цеху ЛГМ практично не супроводжується газовиділенням в повітря цеху, хоч моделі в формах і газифікуються. Це зумовлено вакуумуванням піску форм вакуумними насосами, які створюють залишковий тиск газів близько 50 кПа

(розрідження близько 0,5 атм). Для порівняння, побутові пилососи створюють розрідження (зменшення тиску від атмосферного) повітря на 0,2–0,25 атм. У формі може бути як одна ливарна модель, так і кілька, які кріплять на ливниковому стояку, створюючи кластер моделей. На Рисунок (3b) показано форму, на поверхні якої встановлено 9 воронки, кожна з яких поєднана з окремим кластером. Це означає, що стільки ж вилитих з металу кластерів буде отримано з цієї форми, а в кожному може бути по кілька чи навіть кільканадцять дрібних виливків, як видно на модельних кластерах, показаних на рисунках нижче.

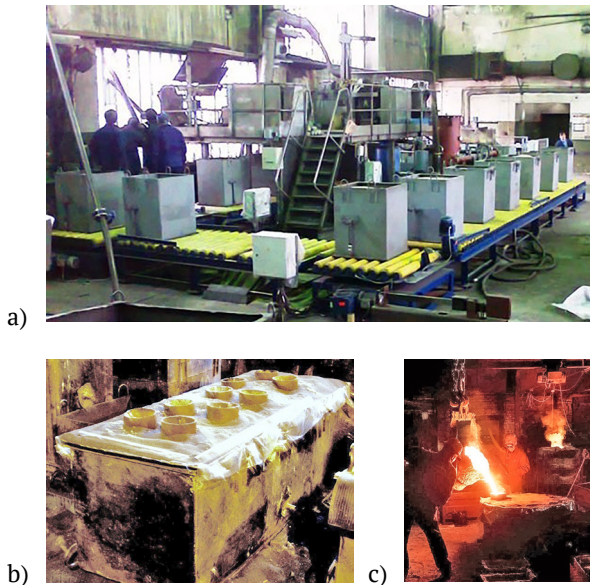


Рисунок 3. Ливарні форми різного розміру і металоемності та процес їх заливання металом

Примітки: а – піщані контейнерні форми на конвеєрі; б – піщані контейнерні форми на заливальному плацу; с – заливання форм металом в цеху ЛГМ

Джерело: фото автора

Крім того, на Рисунках 4 і 5 показано приклади моделей та виливків, які виготовляють дрібними серіями в цеху ЛГМ ФТІМС НАН України. Це робочі органи ґрунтообробного та землерийного обладнання, ланки конвеєрів (зокрема для утилізації твердих відходів, елеваторних комплексів тощо) та інші деталі рухомих чи стаціонарних механізмів (5а). Робочі органи ґрунтообробного та землерийного обладнання охоплюють різні типи лемішів, лопат, долот, дисків, розпушувачів, ножів та культиваторів, які використовуються для підготовки та обробки ґрунту в сільськогосподарських процесах. До землерийних органів належать зуби, коронки, адаптери ковшів екскаваторів, лопат бульдозерів, ковші техніки, як обладнання для землерийних робіт, дорожнього будівництва, цивільного чи подвійного будівництва, зносу будівель, розробки кар'єрів, будівництва шляхів, садівництва та ландшафтного дизайну тощо. На Рисунку 5b показано вилиті зуби і коронки на землерийних машинах та трак для гусеничної землерийної та подібної до неї техніки. Ланки конвеєрів, що представлено на рисунках, використовуються в комплексах для утилізації твердих відходів, де вони транспортують матеріали різного походження, а також в елеваторних системах для переміщення зерна та інших сипких матеріалів. Окрім того, у цеху виготовляються деталі для рухомих механізмів, зокрема шестерні, вали, корпуси підшипників та інші компоненти, що забезпечують надійну роботу машин, а також деталі для стаціонарних механізмів, таких як насоси, компресори, гідравлічні системи, які використовуються в промисловості та будівництві.



Рисунок 4. Приклади ливарних моделей металовиробів навісного ґрунтообробного та землерийного обладнання

Джерело: фото автора

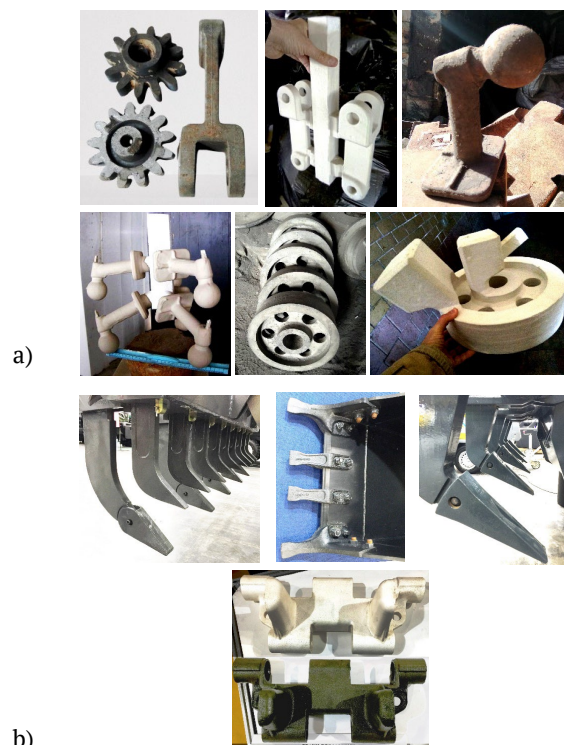


Рисунок 5. Виливки та моделі ланок конвеєра та інших деталей механізмів (а), вилиті зуби і коронки на землерийних машинах та трак для гусеничної техніки (б)

Джерело: фото автора

Як у теперішній час, так і у повоєнний період довгий час існуватиме значна потреба у виготовленні (за схожими способами до виливання землерийних зносостійких органів) тріщиностійких контактних (витратних/змінних) органів протимінних тралів (Modular mine trawl..., 2018) (коткових, ножових чи бойкових), оскільки потреба розмінування вимагатиме спеціальної техніки – машин для розмінування, для перевезення вибухонебезпечних предметів, міношукачів, іншої спецтехніки. Протягом багатьох років будуть актуальними потреби в ремонті цієї техніки й постачанні запчастин для неї.

Придатність ЛГМ-процесу до рентабельного дрібносерійного виробництва різноманітної номенклатури виливків особливо вигідна з огляду на обставини, що склалися протягом останніх десятиліть, коли боротьба за конкурентну перевагу у виробництві продукції на основі збільшення продуктивності процесу призвела до того, що в деяких галузях майже досягнуто її максимум, а запити потенційного споживача інноваційної продукції змінилися у бік підвищення ступеня індивідуалізації зі збереженням доступного рівня цін (Baykasoglu *et al.*, 2004). У багатьох сферах економіки почалася масова кастомізація продукції, за якої замовник бере активну участь у процесі проектування необхідного йому товару, зокрема через NFC-систему (бездротової передачі даних та платежів). Така трансформація виробництва сприяє скороченню часу виходу товару на ринок, зменшенню обсягів складських запасів, часу їх

зберігання та кількості одиниць продукції, а загальна цифровізація технологічних процесів змушує компанії впроваджувати передові методи виробництва, щоб залишатися конкурентоспроможними (Natsir, 2022).

У відповідь на вищезазначені потреби, обладдйливі перспективи для дрібносерійного ЛГМ-процесу відкриває 3D-друк ливарних моделей, при якому без модельної оснастки з цифрового креслення на екрані монітора за допомогою принтера друкується модель протягом 5-10 годин (в ідеалі), а протягом наступних 1-2 днів за цією моделлю методом ЛГМ можливе виготовлення виливка. Така «матеріалізація» ливарної моделі з цифрового файлу в концепції «Індустрія 4.0» називається «цифро-фізичним перетворенням», що значно скорочує процес від креслення до металопродукції та відповідає одному з перспективних кроків цифрової трансформації ливарної галузі як з огляду швидкої зміни асортименту продукції у відповідь на зміну потреб ринку, так і наближення до концепції «виробництво як послуга».

З метою пояснення структури процесу ЛГМ стосовно впливу основних технологічних параметрів на якість виливків, а також для оцінки масиву такої інформації в його кількісному (згідно з числом чинників впливу) і якісному складі (за організаційно-технологічною сутністю впливу) застосували діаграму за методом Ішікави. Оскільки основна задача ливарного виробництва – отримання виливка з конкурентоздатним відношенням його якості до собівартості, то цей показник вказали на діаграмі в якості кінцевого продукту (Рис. 6).

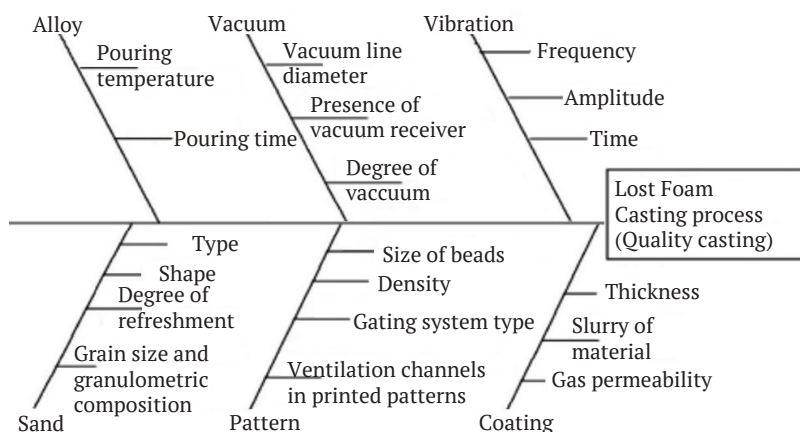


Рисунок 6. Діаграма Ішікави для ЛГМ-процесу

Джерело: розроблено автором на основі роботи Kumar *et al.* (2007)

Основні гілки, які визначають якісні та експлуатаційні характеристики литого виробу позначено таким чином: сплав (виливка), вакуум (в ливарній формі), вібрація (форми при ущільненні піску), пісок (наповнювач ливарної форми), модель (її якісні характеристики), покриття (моделі) (Kumar *et al.*, 2007). Для кожної з таких гілок встановлено визначальні чинники другого порядку. Крім того, на діаграмі до вказаних у названій роботі додано доповнення до чинників другого порядку,

застосувавши системний підхід з роботи O.Y. Shinsky *et al.* (2018). Гілку діаграми щодо формувального піску до трьох відомих показників доповнено новим – «ступінь освіження піску». В багаторазовому обороті формувального піску при ЛГМ регулярне додавання має становити не менше 5 % свіжого або регенованого кварцового піску в кожному циклі формовки сприяє підтриманню належної газопроникності наповнювача ливарної форми без надмірного накопичення в ньому

забруднень, що зменшує газотвірність піску і вірогідність попадання газів із ливарної форми в повітря цеху. Це підтверджує і дослідження R. Michaels (2005), який відзначає, що нерегулярне освіження піску може призводити до надмірного його забруднення і місцевого обсіпання форми та контакту металу з продуктами газифікації, не повністю видаленими з порожнини форми, та спричиняє зниження якості виливків.

В гілці «Модель» на якість виливка, крім пористості матеріалу моделі і його густини, може впливати тип ливникової системи, приклад комп'ютерного моделювання якої для ЛГМ описано в роботі S. Jordan & M. Debruin (2017). За традиційним, описаним в технічній літературі ЛГМ-процесом перевагу віддають сифонним ливниковим системам (Shulyak, 2007). Також вказано фактор вентилявання друкованих чи комбінованих (з друкованими вставками, аналогічно роботі S. Jordan *et al.*, (2021) ливарних моделей, густина яких може бути вищою, ніж у типових пінополістирольних. Останнє допомагає вивести надмірну кількість газів за межі форми через верхню частину її поверхні, або у вакуумований пісок форми по вентканалах, як показано в роботі V.S. Doroshenko (2021).

Для гілки «покриття» додано показник – «газопроникність», як важливу характеристику, яка підбирається складом (рецептурою) рідкої фарби, що утворює покриття на поверхні моделі. Газопроникність покриття – один з чинників (наряду з величиною вакууму), які регулюють протитиск газів на розплав металу і впливають на його формозаповнюваність. Подвійне нанесення фарби зменшує газопроникність її покриття.

До гілки «вакуум» внесли чинники «діаметр вакуумпроводу» та «наявність вакуум-ресивера» в цеховій системі вакуумування, що впливають на стабільність режиму вакуумування форми, оскільки її вакуум може знижуватись під час заливання цієї форми рідким металом, який може частково розгерметизувати пісок форми (місцево пропалювати покривну синтетичну плівку на формі), особливо при заливанні багатомісних форм та кількох форм підряд. Наявність ресивера (газового акумулятора) з вакуумпроводом діаметром не нижче ДУ 50 «згладжує» можливі піки газовиділень і зниження рівня вакууму в порах піску при заливанні форм. Чинники гілок «сплав» і «вібрація» залишили на діаграмі без доповнень.

Підсумовуючи розглянуті сутність ЛГМ-процесу і його різноплановість щодо різносерійності та широкого діапазону за вагою виливків, а також вплив переліку факторів на якість виливків, що представлено на поопераційній схемі та діаграмі Ішікави, додатково зазначимо, що розвиток ливарного виробництва тісно пов'язаний з урізноманітненням продукції машинобудування (Lehmhus, 2022). Зокрема, значне поширення технології ЛГМ, що розглянута в статті, відбулося останніми десятиліттями в Китаї, який за цей час став провідною ливарно-металургійною державою, виробляючи близько половини тоннажу виливків світу.

Як зазначає у своїй роботі V.A. Gnatush (2024), хоча розповсюджений ваговий діапазон виливків для ЛГМ-процесу складає від 0,2 до 5000 кг, у Китаї швидкому нарощенню випуску литва, наряду з іншими чинниками, сприяла поява цехів ЛГМ для виробництва великих і середніх виливків з типовими для Китаю автоматизованими конвеєрними лініями рядного руху контейнерів з габаритами нерідко понад 2 м. При русі ливарного контейнера на таких конвеєрах в нього з першого (з початку формовки) бункера в засипають піщану «постіль», потім на неї встановлюють модельні кластери, з двох наступних бункерів засипають піском кластери з віброущільненням піску. Для вакуумування піску форми контейнери виконані з коробчастими каналами і сітчастими фільтрами, розташованими газопроникною сітчастою поверхнею на стінках з боку порожнини контейнера і при засипанні в контейнер піску контактують з ним. Нерідко в контейнерній формі поміщають 12-16 кластерів моделей і кожний заливають металом крізь окрему воронку, досягаючи високої металосємності форми, недоступної для форм у парних опоках для традиційних видів лиття. Досвід Китаю, як провідної ливарної держави, зумовлює значні досягнення його в машинобудуванні, що може служити прикладом для України на шляху відновлення і інноваційної трансформації власного машинобудування.

Крім того, саме 3D-технології є характерною рисою цифрових інновацій, що дозволяють «матеріалізувати» з цифрових креслень пінополімерні ливарні моделі для ЛГМ шляхом «перетворення» цифрових даних в фізичні об'єкти, що в термінах концепції «Індустрія 4.0» (Industry 4.0., 2015) називається цифро-фізичним перетворенням (digital-to-physical conversion). Ці технології у майбутньому можуть забезпечити навіть цілодобове виробництво без застосування будь-якої модельної оснастки. При цьому нескладна зміна конструкції металопродукції на її цифровому кресленні, що швидко відображається на друкованій моделі і виливкові, буде відповідати бізнес-моделі «виробництво як послуга», або виробництво на вимогу, замість інвестування у великі виробничі потужності і оснастку, як це було до появи 3D-друку в ливарному виробництві.

Висновки

Проведений аналіз ливарного виробництва широкої номенклатури металовиробів на основі технології ЛГМ служить одним з прикладів розкриття потенційних напрямів відновлення машинобудування в країні шляхом застосування таких технологій і досвіду діючих українських підприємств та наукових установ. Технологія виготовлення широкої номенклатури металопродукції, що в нинішніх непростих українських умовах застосовується передусім для дрібносерійного (ремонтного) виробництва, зберігає значні можливості сприяння відновленню галузі машинобудування, особливо на початкових етапах, шляхом розвитку невеликих підприємств. Серед переваг дрібносерійного виробництва малих підприємств

описано такі: можливість невеликих початкових інвестицій, гнучкість виробництва зі швидкою адаптацією до ринкових змін зміною асортименту продукції, її індивідуалізація за специфічними потребами замовників, інноваційний потенціал зі спрощенням впровадження нових технологій, включно з цифровізацією.

Перспективне виробництво широкої номенклатури металопродукції в ливарному цеху з процесом лиття за моделями, що газифікуються, як і показані зразки його продукції, демонструють особливість та гнучкість технології, невисокі інвестиційні потреби організації такого виробництва завдяки можливості виготовлення більшості обладнання та оснастки українськими підприємствами. У роботі також описано шляхи цифровізації з акцентом на 3D-друк ливарних моделей з засобами їх вентиляції з метою підвищення екологічності

виробництва. Візуалізація структури процесу ЛГМ за методом діаграми Ішікави з урахуванням останніх досліджень та значного досвіду удосконалення цього ливарного процесу у ФТІМС НАН України показала вплив основних технологічних параметрів на остаточну якість виливків.

Перспективні напрямки досліджень у сфері сучасних технологій ливарного виробництва зосереджуються на впровадженні новітніх матеріалів, автоматизації процесів, а також екологічно чистих технологій, які знижують енергоспоживання та викиди. Серед найбільш актуальних напрямів – розвиток адитивного лиття (Additive Casting) та застосування 3D-друку для створення форм і моделей, що дозволяє скоротити витрати часу та матеріалів на прототипування і підвищити точність виготовлення виробів.

Список використаної літератури

- [1] Askerov, M.G. (2021). New materials for the production of interchangeable parts of tillage agricultural machinery. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*, 2(8), 3-8. doi: 10.20998/2413-4295.2021.02.01.
- [2] Baykasoglu, A., Büyükoçkan, G. & Dereli, T. (2004). [Technology oriented new product development in a rapidly changing world](#). In *Proceedings of the conference IMS-2004, 4th international symposium on intelligent manufacturing systems* (pp. 1040-1048). Sakarya: Turkey.
- [3] Bilopolskyi, M., Merkulov, M., Tsimoshynska, O., Pali, S., & Mazur, Y. (2024). Modern trends in the development of the market economy of Ukraine in the vector of the globalized innovation and investment space. *Bulletin of the East European University Economics and Management*, 1(31), 16-29. doi: 10.58253/2078-1628-2024-1(31)-002.
- [4] Cheiliakh, O.P., & Cheiliakh, Ya.O. (2020). Implementation of physical effects in the operation of smart materials to form their properties. *Progress in Physics of Metals*, 21(3), 363-463. doi: 10.15407/ufm.21.03.363.
- [5] Densen Group. (2020). *The process sequence of Lost Foam casting process*. Retrieved from <https://surl.li/dieezh>.
- [6] Doroshenko, V.C., & Kalyuzhny, P.B. (2024). Isothermal hardening of iron-carbon alloys combined with their casting. *The Scientific Technical Journal Metal Science and Treatment of Metals*, 30(1), 47-59. doi: 10.15407/mom2024.01.047.
- [7] Doroshenko, V.S. (2021). Neutralization of gases during metal casting by gasifying models and prerequisites for using 3D-printed models for this. *Casting Processes*, 145(3), 32-43. doi: 10.15407/plit2021.03.032.
- [8] Feier, A., Dankanych, V., & Niagovskyi, I. (2023). [Diversification of regional economy: Key to sustainable development](#). *International Scientific Journal "Education and Science"*, 1(34), 238-246.
- [9] Gnatush, V.A. (2024). Metal castings market 2020-2022: World, Europe, Ukraine. *Casting Processes*, 2(156), 64-74. doi: 10.15407/plit2023.02.056.
- [10] Ishchuk, S.O. (2022). [Development of mechanical engineering in Ukraine: Problems and ways to solve them](#). Lviv: State University Institute of Regional Studies named after M. I. Dolishny NAS of Ukraine.
- [11] Ishikawa, K. (1985). [What is total quality control? The Japanese way](#). London: Prentice Hall.
- [12] Jordan, S., & DeBruin, M. (2017). Additive manufacturing evaporative casting. In *Contributed papers from materials science and technology 2017 (MS&T17)* (pp. 281-288). Pittsburgh: David L. Lawrence Convention Center. doi: 10.7449/2017/MST_2017_281_288.
- [13] Jordan, S., Debruin, M., Cilkilic, E., & Luo, A. (2021). [Thin-walled ductile iron with lost foam and nobake casting](#). *Modern Casting*, 111(9), 40-45.
- [14] Kumar, S., Kumar, P., & Shan, H.S. (2007). Effect of process parameters on the solidification time of Al-7%Si alloy castings produced by VAEP process. *Materials and Manufacturing Processes*, 22(7-8), 879-886. doi: 10.1080/10426910701448941.
- [15] Kushnirenko, O., & Gakhovich, N. (2023). Strategic directions of post-war recovery of mechanical engineering in Ukraine. *Economic Bulletin of the University*, (56), 5-15. doi: 10.31470/2306-546X-2023-56-05-15.
- [16] Lehmus, D. (2022). Advances in metal casting technology: A review of state of the art, challenges and trends - Part I: Changing markets, changing products. *Metals*, 12(11), article number 1959. doi: 10.3390/met12111959.
- [17] Michaels, R. (2005). *Final technical report quantification and standardization of pattern properties for the control of the lost foam casting process*. Seymour: Industrial Analytics Corporation. doi: 10.2172/850341.
- [18] Modular mine trawl with improved characteristics. (2018). Retrieved from <https://surl.gd/gmnoop>.
- [19] Natsir, Ch. (2022). [What is advanced manufacturing and its benefits for your company?](#) Retrieved from <https://www.hashmicro.com/blog/what-is-advanced-manufacturing/>.

- [20] Shinsky, O.Y., Shalevska, I.A., Shinsky, V.O., Kalyuzhny, P.B., Shevchuk, T.V., Lysenko, T.V., Slyusarev, V.A., Pogrebach, E.V., & Kolomytsev, S.V. (2018). [Principles of construction and identification of a multi-level system for controlling parameters of the technological cycle of production of cast structures](#). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/1, 25-32.
- [21] Shulyak, V.S. (2007). *Casting according to gasified models*. St. Petersburg: Professional.
- [22] Sobkevich, O.V. (2024). *Directions of the development of mechanical engineering in Ukraine as a driver of economic development during the war and in the post-war period*. Retrieved from <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/ekonomika/napryamy-rozbudovy-mashynobuduvannya-v-ukrayini-yak-drayvera-ekonomichnoho>.
- [23] Unite engineering schools for the reconstruction of Ukraine. (2024). Retrieved from <https://kpi.ua/node/20803>.

Volodymyr Doroshenko

Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher
Physical and Technological Institute of Metals and Alloys of the NASU
03142, 34/1 Vernadsky Blvd., Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-0070-5663>

Oleksandr Yanchenko

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Vinnytsia National Technical University
21021, 95 Khmelnytske Shose Str., Vinnytsia, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3888-3772>

An example of foundry technology for the production of a wide range of metal structures for further scaling in the process of developing mechanical engineering

Abstract. In view of the prospects for the development of domestic mechanical engineering, the type of production of metal products and an active example of its implementation, which are recommended for scaling, are considered. The production of a wide range of metal products in different series, characteristic of the Lost Foam Casting (LFC) technology, can contribute to the creation and strengthening of industrial growth centres at the stage of mechanical engineering restoration. This type of production allows for a quick response to market needs, requires a small initial investment, and has significant potential for scaling up. The flexibility of such production lies in the rapid adjustment of the product range, its customisation to customer requirements, and its innovative potential, which is associated with the simplified introduction of new technologies, including their digitalisation. This article describes a foundry using the LFC process. Samples of its products, features, and advantages of LFC technology are presented, along with the low investment requirements for establishing such a workshop due to the possibility of manufacturing most of the necessary equipment and accessories domestically. The strength of the foundry sand mould in LFC is ensured by the application of physical principles, specifically the unique use of the gas pressure gradient in the mould walls resulting from the evaporation of a disposable foundry pattern made of foam polymer. This enables the creation of a foundry mould from dry quartz sand, which flows around pattern structures of various geometric configurations during formation with vibration compaction, as well as the multiple circulation of this sand. The prospects for the digitalisation of the LFC process, with an emphasis on 3D printing of foundry patterns, are highlighted. The influence of the main technological parameters of LFC on the quality of castings is illustrated using an Ishikawa diagram, where individual factors are marked based on the latest research and significant experience in improving the LFC process by scientists from PTIMA of the National Academy of Sciences of Ukraine

Keywords: small-scale production; foundry; sand mould; Lost Foam Casting; development of mechanical engineering; product nomenclature