

УДК 681.3:621.74:004.8

В. С. Дорошенко<sup>1</sup>, О. Б. Янченко<sup>2</sup>

## ЗАСТОСУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ ТА 3D-ДРУКУ ЛИВАРНОЇ МОДЕЛІ З ВЕНТИЛЯЦІЙНИМИ КАНАЛАМИ В ЇЇ СТІНКАХ

<sup>1</sup>Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ<sup>2</sup>Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**Анотація.** В контексті впровадження концепції «Індустрія 4.0» цифровізація та автоматизація сьогодні стали вже не просто основою конкурентної переваги при виробництві товарів (робіт, послуг), у багатьох сферах вони сприймаються як необхідна умова організації виробничих процесів. Зокрема, завдяки цифровізації та автоматизації ливарного виробництва в Україні є можливість створення потужного потенціалу, що сприятиме відновленню країни. За рахунок розширення застосування комп'ютерних систем для проектування та 3D-друку полімерних ливарних моделей з вентиляційними каналами стала можливою розробка одного із способів лиття металу за моделями, що газифікуються (ЛГМ), з застосуванням друкованих моделей, що відповідає зростаючому тренду цифровізації та автоматизації ливарних процесів. Це стало можливим завдяки підвищенню інтенсивності евакуації продуктів газифікації друкованих моделей у ливарній формі з використанням вакууму цієї форми. Розроблений спосіб дозволяє отримати сумарну вигоду як від достатньо швидкоплинних комп'ютерно-орієнтованих 3D-процесів проектування і друку ливарної моделі, так і від короткотривалих процесів формовки та вибивки виливків завдяки використанню при ЛГМ ливарних форм з сухого піску. При цьому цифрова трансформація ЛГМ поєднується з ресурсоефективністю оборотного застосування формувальних матеріалів без зміни діючих стандартів контролю металопродукції ливарних цехів, а адаптація виробництва до адитивних технологій дозволяє за допомогою мережі Інтернет пряму взаємодію з покупцем товару, який проектується за його індивідуальним цифровим проектом. Останнє відповідає концепції «виробництво як послуга» (Маас). Також таке впровадження застосування комп'ютерних систем і нових цифрових процесів в традиційні ливарні процеси скорочує часовий розрив від створення прототипів і інструментів до масового виробництва металопродукції.

**Ключові слова:** комп'ютерні системи, 3D-технології, 3D-друк, разова ливарна модель, газифікація моделі, ливарне виробництво.

**Abstract.** In the context of the implementation of the "Industry 4.0" concept, digitalization and automation today have become not just the basis of competitive advantage in the production of goods (works, services), in many areas they are perceived as a necessary condition for the organization of production processes. In particular, thanks to the digitization and automation of foundry production in Ukraine, there is an opportunity to create a powerful potential that will contribute to the recovery of the country. Due to the expansion of the use of computer systems for the design and 3D printing of polymer foundry patterns with ventilation channels, it became possible to develop one of the methods of metal casting according to gasifying patterns (LFC) with the use of printed patterns (models), which corresponds to the growing trend of digitalization and automation of foundries processes. This became possible due to the increase in the intensity of evacuation of the products of gasification of printed patterns in the foundry mold using the vacuum of this mold. The developed method allows you to get a total benefit both from fairly fast computer-oriented 3D processes of designing and printing a foundry pattern, as well as from short-term processes of forming and punching out castings due to the use of dry sand foundry molds at LFC. At the same time, the digital transformation of LFC is combined with the resource efficiency of the reversible use of molding materials without changing the current standards of control of metal products of foundries. And the adaptation of production to additive technologies allows direct interaction with the buyer of the product, which is designed according to his individual digital project, with the help of the Internet. The latter corresponds to the concept of "manufacturing as a service" (Maas). Also, this implementation of the use of computer systems and new digital processes in traditional foundry processes shortens the time gap from the creation of prototypes and tools to the mass production of metal products.

**Keywords:** computer systems, 3D technologies, 3D printing, one-time foundry pattern, pattern gasification, foundry production.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-58-3-53-58>.

### Вступ

В контексті впровадження концепції «Індустрія 4.0» цифровізація та автоматизація сьогодні стали вже не просто основою конкурентної переваги при виробництві товарів (робіт, послуг), у багатьох сферах вони сприймаються як необхідна умова організації виробничих процесів [1]. Інформаційні технології впроваджуються у дедалі більше галузей, що дозволяє оперативніше і точно виконувати поставлені завдання, здійснювати постійний моніторинг виробництва та бізнес-процесів, виключати зайві етапи роботи та оптимізувати її. Зокрема, завдяки цифровізації та автоматизації ливарного виробництва в Україні є можливість створення потужного потенціалу, що сприятиме відновленню країни.

### Актуальність

Як одна з галузей цифровізації, 3D-друк (адитивне виробництво) з застосуванням сучасних комп'ютерних систем дозволяє змінювати як конфігурацію ливарної продукції, так і конструкцію ливарних моделей виключно за рахунок внесення змін в цифрову модель продукції без наступного переформатування виробничого базису. Серед ливарних технологій відомий «ЛГМ-процес» (Lost Foam Casting Process), який вирізняється тією характерною особливістю, що здійснюється шляхом лиття металу за разовими полімерними (піно-полімерними) ливарними моделями, які газифікуються – випаровуються в ливарній

формі одночасно з заміщенням цих моделей розплавленим металом. Цей процес має значний потенціал як до впровадження 3D-технологій, так і до створення різновидів способів з підвищенням гнучкості щодо випуску дрібносерійної, разової (зокрема кастомізованої) продукції для швидкого реагування на потреби ринку, а також в плані екологізації з наближенням до технологій, що не шкодять довкіллю.

### Мета

Мета статті полягає розробці способу застосування комп'ютерних систем для проектування та 3D-друку полімерної ливарної моделі з вентиляційними каналами в її стінках та описі прикладу застосування такої моделі в ливарному процесі виготовлення металевих виливків широкою номенклатури

### Огляд відомих технічних рішень і аналіз їх недоліків

В Україні запатентовано способи 3D-друку об'ємних (тривимірних) виробів із тугоплавких матеріалів [2] з застосуванням плазмотрону, а також спосіб тривимірного друку металевого виробу [3] шляхом пошарової побудови виробу, що включає створення 3D-моделі виробу в програмі комп'ютерного (автоматизованого) моделювання (CAD), виведення її в управляючій пристрій 3D-принтера з подальшим поділом на горизонтальні шари, подачу у зону друку розплавленого модельного матеріалу з подальшим його застиганням, а як модельний матеріал використовують металевий електроіскровий електрод.

Недоліками цих двох способів являються застосування високої вартості енергоємне обладнання, що є унікальним для вітчизняних заводів. Також плавлення і друк вказаних у цих способах матеріалів і металу потребує значних витрат енергії та захисної атмосфери чи вакуумування для камери друку. Все це приблизно на порядок збільшує собівартість металовиробів порівняно з відпрацьованими ливарними способами. Також не розроблено вітчизняних стандартів сертифікації друківаних металевих та виробів із тугоплавких матеріалів щодо відповідності марки їх матеріалу діючим нормам.

Прикладом іншого і значно простішого напряму впровадження 3D-технологій в ливарне виробництво є 3D-друк разових полімерних ливарних моделей для ЛГМ-процесу, за якими виконують лиття металу методом їх газифікації у вакуумованих ливарних формах з сипкого піску [4]. В традиційній технології ЛГМ застосовують моделі з пінополістиролу (ППС) як разове оснащення, на заміну якого останнім часом завдяки дослідженням прагнуть впровадити 3D-друковані полімерні моделі. Такі полімерні друковані ливарні моделі призначені для формування в піску ливарної форми і газифікації їх при заливанні цієї форми металом. При цьому, оскільки вилівок утворюється при випаруванні (газифікованій) моделі, то контроль якості затверділого вилівка та відповідність марки його металу не відрізняється від традиційно застосовуваних, відпрацьованих і унормованих ливарних операцій в розрізі діючих стандартів.

### Розв'язання задачі

В розробленому і описаному нижче способі [5], порівняно з традиційними різновидами ЛГМ-процесу, значно (в рази або навіть на порядок) скорочується тривалість виготовлення разової друкованої ливарної моделі. Підготовка до 3D-друку з застосуванням комп'ютерної системи полягає в тому, що в цифровому кресленні металеві деталі на персональному комп'ютері відображають ливарну технологію, цим самим це креслення «перетворюють» в креслення ливарної моделі, а в ньому додатково креслять вентиляційні газивідні канали в стінках ливарної моделі для їх виконання на етапі друкування цієї моделі. За готовою друкованою моделлю виконують досить швидко (протягом хвилини) формовку цієї моделі в сипкому піску з подальшим застосуванням традиційних операцій ЛГМ-процесу, недорогого за вартістю вилитої металопродукції (порівняно зі способами [1, 2]).

Розглянемо подробиці способу [5]. В цілому, застосування друкованих моделей дає суттєвий вигад від значного скорочення тривалості підготовки виробництва нової продукції, таке виробництво не потребує оснастки (прес-форм) для виготовлення ливарних моделей, яка є нерідко складною і дорогою за вартістю. Це дозволяє розширити геометрію виливків, друкувати разові моделі навіть неможливої раніше конфігурації з високою чистотою поверхні, змінюючи дизайн металовиробу лише за рахунок внесення змін в його цифрову модель в комп'ютерній системі без будь-якої зміни обладнання в ливарному цеху. Швидкий автоматизований 3D-друк з цифрових даних ливарних моделей (навіть разової конструкції за індивідуальним замовленням або складної геометричної конфігурації) і по ним - металевих виливків все більше є предметом досліджень провідних ливарних і машинобудівних компаній світу і відповідає загальному напрямку цифровізації ливарного виробництва.

Проте, проблема полягає в тому, що друковані полімерні моделі мають більшу густину і, відповідно, газотвірність, ніж традиційні моделі з ППС, тому такі причини поки не дозволяють при ЛГМ отримувати в промислових масштабах вилівки стабільної якості відомими способами за друкованими моделями і, отже, технологія лиття за такими моделями зараз знаходиться лише на стадії експериментального випробовування і адаптивної трансформації ЛГМ-процесу до застосування в ньому друкованих ливарних моделей. Сьогодні основні недоліки полягають в тому, що надмірний тиск газів від газифікації більш масивної (проти моделі з ППС) друкованої моделі може призвести як до викидів металу з ливарної системи, так і до гальмування заповнення ним форми з утворенням браку виливків по недоливам. А також сучасний друкований матеріал моделей дає більший вуглецевий (коковий чи зольний) зали-

шок, ніж ППС, що також негативно впливає на якість виливків.

В способі [4] задача зниження надмірного тиску газів від газифікації моделі з виведенням їх з піщаної форми вирішується шляхом використання оболонкових порожнистих друківаних ливарних моделей, стінки яких мають поєднані між собою порожнини з внутрішніми тонкостінними каркасами чи розпірками. Ці порожнини зменшують масу (та газовиділення) моделей і поєднані з трубками, якими гази від газифікації цих моделей виводять за межі ливарної форми. Таке сполучення порожнин, що грають роль каналів, моделей з повітрям цеху зменшує газовий тиск від газифікації моделей до атмосферного. В цьому способі завдяки окисленню (спаленню) газів від моделі на поверхні форми зроблено акцент на екологізації ЛГМ з наближенням до технологій, що не шкодять довкіллю.

На жаль, порожнисті моделі [4] мають ряд таких недоліків, як можливість застосування лише для достатньо товстостінних виливків, адже дві протилежні стінки навколо порожнини повинні бути достатньо міцними і щільними, щоб запобігти їх деформації при засипанні в форму піску і вібрації форми. Такі ливарні моделі практично неможливо видрукувати цільними, а треба склеювати з оболонок, вони придатні для виливків обмеженої номенклатури, таких як крупні лопаті тощо. Програми друкування оболонкових порожнистих моделей (порівняно з друкуванням цільних) більш складні, друкування потребує високошвидкісних принтерів, а збирання з установкою внутрішніх тонкостінних каркасів чи розпірок в порожнинах моделей – механічної обробки, ручної праці і прецизійного контролю кінцевої геометрії моделі при склейці оболонок і серцевини.

Тому з метою зниження витрат на виготовлення цільної 3D-друкованої ливарної моделі і забезпечення її газовідвідними вентканалами застосували досі незадіяний при друкуванні моделі потенціал комп'ютерної системи. За допомогою апаратного комплексу персонального комп'ютера, що забезпечує введення, оброблення, збереження та виведення інформації, в стінках ливарної моделі на цифровому кресленні її конструкції були внесені вентканали для виводу з моделі газів протягом всього періоду її газифікації при русі металу вздовж цих каналів. Це дає перспективу значного розширення номенклатури виробництва, в тому числі тонкостінних виливків, а також сприяє інтенсифікації виводу продуктів газифікації з ливарної форми за допомогою цих каналів і знімає перешкоди застосування друківаних моделей для ЛГМ, пов'язаної з ростом виділення продуктів газифікації.

На нинішньому початковому етапі застосування друківаних ливарних моделей цифрове 3D-креслення металовиробу створює конструктор в комп'ютерній системі CAD і передає виробникові для друку, або виробник сам може створити таке 3D-креслення (наприклад, скануванням готового виробу-прототипу). Потім 3D-креслення (3D-модель) цього виробу в комп'ютерній системі CAD доповнюють змінами (наносять ливарну технологію) з урахування усадки металу відповідно до розмірів ливарної моделі, припусків на механічну обробку тощо, конвертують файл в формат STL для 3D-друку і друкують цю ливарну модель. Оскільки 3D-друк лише починає застосовуватись для ЛГМ, то вентиляційні канали в ливарній моделі вздовж її стінок по мірі поступового заміщення моделі металом не друкували. Такої інформації не виявлено. В традиційній для ЛГМ моделі з ППС за потреби вентиляційні канали виконували механічним способом. При друкуванні ливарних моделей складної геометричної форми та тонкостінних конструкцій виконати вздовж її стінок канали (навіть з багатьма згинами) найпростіше при її друкуванні за кресленням цифрової 3D-моделі, в якому згідно розробленому способу [5] слід відобразити ці канали.

Таким чином, в перелік операцій процесу 3D-друку ливарної моделі, що складає створення 3D-моделі у програмі CAD, виведення цієї 3D-моделі у форматі STL в управляючий пристрій 3D-принтера з поділом на горизонтальні шари та пошарове адитивне вирощування ливарної моделі з полімерного термопластичного матеріалу цим принтером, нами внесено операцію відображення вентиляційних каналів на кресленні цифрової моделі і отриманні їх у друкованій ливарній моделі для виводу газів в напрямку руху розплавленого металу при газифікації ливарної моделі в піщаній ливарній формі.

Після 3D-друку вентиляційної ливарної моделі за цією моделлю виготовляється ливарна форма з сухого піску, яка заливається розплавленим металом при її вакуумуванні і газифікації теплом металу ливарної моделі з відведенням газових продуктів газифікації крізь газовідвідні вентканали. Для виходу газів у пори піску форми ці канали продовжують полімерними трубками, вихідні кінці яких закривають газопроникним вентами, що не пропускають пісок. Крім того, в разі застосування вставок з ППС в комплекті з 3D-друкованою ливарною моделлю канали для виводу газів можуть друкувати по стику цих вставок з друкованою частиною ливарної моделі шляхом друку борозенок в ній. Також полімерні трубки застосовували зі стінками достатньої міцності для запобігання їх деформації при дії на них вакууму в піску форми, або з цією ж метою вставляли в них металевий дріт у вигляді спіралі, або газопроникні пробки з піщаної суміші, які служили вентами.

Приклад проектування ливарної друкованої моделі для розробленого нами способу проілюстровано на рис. 1, а – в, де на рис. 1, а показано варіанти конструкцій зубчастих валків 1, для лиття яких застосовано новий спосіб. Це деталі соломорізки складної геометричної форми. Поруч з одним з варіантів валка

показано приклад моделі ливникової системи 2 з ППС.

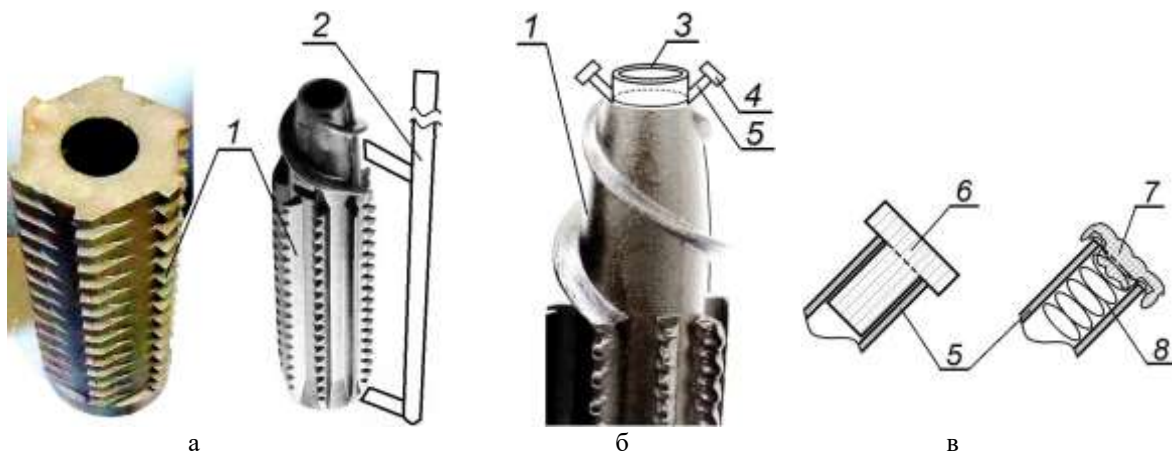


Рисунок 1 – Валки і конструкції їх модельних комплектів: а – приклади валків і ливникової системи; б - верхня частина моделі валка; в – приклади вент в поздовжньому розрізі; 1 - приклади валків; 2 - модель ливникової системи; 3 - патрубок з ППС; 4 – вента; 5 – трубка; 6 – вента - піщана пробка; 7 – вента з вати; 8 – спіраль з дроту.

Подібної конструкції валок (як аналог), модель якого без вентканалів вирізують по частинам на 3D-фрезері з блочного ППС, а потім склеюють ці частини, описано в роботі [6]. Така механічна обробка подібних моделей має той недолік, що супроводжується утворенням відходів у вигляді стружки, витратами по вивозу її у відвал, а також потребує прецизійного інструменту та ручної роботи по склеюванню. Поверхня моделі з ППС має більшу шорсткість ніж друкованої моделі.

На рис. 1, б показано верхню частину моделі валка 1, в центральний повздовжній внутрішній канал якої, вставлено на всю довжину моделі 1 тонкостінний патрубок 3 (циліндричної форми з внутрішнім каналом) з ППС низької густини. Робочою частиною валка є зовнішня, а внутрішній центральний канал служить для полегшення маси виливка і при формувці заповнюється піском. На внутрішній стороні вздовж центрального циліндричного каналу моделі 1 при друкуванні виконано борозенки (не показано), які при стику з патрубком 3 утворюють повздовжні вентканали, які продовжено вставленими в них полімерними (з поліпропілену) трубками 5 з вентами 4. На рис. 1, б показано дві трубки 5, але при відпрацюванні способу ЛГМ друкували не менше чотирьох борозенок, кожна з яких утворювала канал з трубкою 5 і вентом 4. Приклади виконання вент показано на рис. 1, в. Виготовлена з піщаної суміші вента 6 служить пробкою, а вента 7 виконана з вати, що опирається спіраль 8 з металевого дроту. Замість трубки можливе утворення патрубку обертанням плівки «скотч» навколо спіралі 8.

Модель валка 1 має таку геометричну форму, що її складно виготовити цільною з ППС відомими способами, її зубці мають ложкоподібні виїмки (рис. 1, б), тому оптимальним виявився 3D-друк. Повздовжня стінка моделі 1 з центральним каналом досить тонка, тому, щоб не ослаблювати конструкцію, вентканали виконали на поверхні цього центрального каналу з прямолінійних борозенок, які стикуються із вставкою – циліндричним патрубком 3 і сполученні з трубками 5. Венту-пробку 6 виготовили з піщано-рідкоскляної наливної суміші з високою газопроникністю, а вента 7 з вати утримується стінками трубки і спіраллю, яка потрібна в разі застосування м'якої трубки. Аналогічно часто армують гнучкі трубопроводи побутових пылесосів. Для виконання вентканалів методом утворення борозенок, крім застосування вставок типу патрубку 3 з ППС, також можливо борозенки з тонкими щілинами з боку поверхні моделі заклеювати смужками синтетичної плівки типу «скотч».

Для випробування способу моделі друкували методом пошарового наплавлення (FDM) з полілактиду (PLA) – біорозкладного термопластичного полієфіру, який є одним з найбільш широко використовуваних і недорогих за вартістю термопластиків для друку. PLA має густину 1240 кг/м<sup>3</sup>, температуру плавлення 150-160 °С, температуру кипіння 227 °С. Принцип роботи FDM заснований на плавленні, екструзії термопластичних полімерних ниток (філаментів) і подальшому осадженні розплавленого матеріалу шар за шаром для формування деталі, що використовується на найбільш поширених нескладних принтерах. Зараз такі порівняно низько бюджетні принтери часто навіть називають «шкільними», маючи на увазі їх поширення для навчання дітей в школі азам 3D-друку.

Випробування способу в ливарному цеху ЛГМ відбувалось наступним чином. 3D-друковану модель валка 1 з ливниковою системою 2, вставкою 3 і трубками 5 покрили протипригарною фарбою, не фарбуючи трубки і венти. При формуванні в контейнері моделі сухим піском з його вібраційним ущільненням контейнер зверху загерметизували синтетичною плівкою, вивели крізь неї верхню частину моделі ливникової системи і поставили на неї керамічну воронку для спрямування струменю металу.

Заливання розплаву високоміцного чавуну у форму виконували при її вакуумуванні, під'єднавши до трубопроводу цехової вакуумної системи, в якій підтримували залишковий тиск повітря на рівні 40-50 кПа. При підведенні по ливниковій системі головним чином знизу до моделі металу, він спричиняв газифікацію моделі при русі знизу вгору, гази від газифікації моделі по вентканалах відкачувались крізь трубки 5 і венти 4, далі в пісок форми і попадали крізь трубопровід від форми до вакуумної системи цеху, де проходили очищення. Рівень вакууму на поверхні венти наближався до рівня на поверхні моделі, залежав від відстані венти до вакуумного фільтра контейнерної форми, але газопроникність вент була вищою, ніж газопроникність типових для ЛГМ протипригарних фарб. При заливанні металу за рахунок інтенсивної газифікації моделі рівень залишкового газового тиску в зазорі «метал-модель» був вищим, ніж на поверхні «модель-форма», що забезпечувало стабільність стінки форми в момент контактування її з металом. Після заливання металом форми, охолодження в ній вилівка протягом кількох годин і видалення його з форми отримали вилівок високої якості. Короткі металеві стовпчики на місцях газифікації трубок 5 видалили механічним способом під час операції відокремлення від вилівка елементів ливникової системи.

Застосування комп'ютерних систем для проектування та 3D-друку ливарної моделі з вентиляційними каналами в її стінках знижує витрати на виготовлення таких вентиляційних моделей за рахунок автоматизації їх виконання друкуванням, такі канали нерідко не просто, чи навіть неможливо, інакше виконати в стінках складних за конфігурацією моделей. Для ЛГМ-процесу за моделями, які мають більшу масу на одиницю об'єму і дають більше газів при їх газифікації, ніж традиційні ливарні моделі з ППС, вентканали зменшують масу моделі та дозволяють інтенсифікувати відкачування газів завдяки вакууму форми. Протягом всього процесу газифікації моделі завдяки вакууму в піску форми іде примусове видалення (відсмоктування) газів у вакуумований пісок форми крізь ці канали моделі, продовжені трубками з вентами. Водночас канали спрямовують потоки металу, сприяючи течії створенням в них низького газового тиску.

Таким чином, для друкованих моделей задіяно принцип: чим більше газів утворюється в ливарній порожнині форми, яку заповнює метал, випаровуючи модель, тим більше слід застосувати засобів їх видалення разом з підсиленням впливу вакууму форми для відкачування як газів, так і рідкого металу, що рухається вслід за газами, для створення кращих умов заміщення моделі, ніж за раніше відомими способами ЛГМ. Відкачування газів також дозволить разом з ними вивести дрібні частинки сажі чи так званого коксового залишку, що запобігатиме їх негативному впливу на деякі сплави, що можуть з ними реагувати. Друковану модель з таким створенням в ній направленою газівідводу під впливом вакууму за своєю функцією в ідеалі можна розглядати як вакуумпровід для відкачки продуктів від власної газифікації. Також можливий такий термін, як «друкована модель з направленою пористістю».

Описаний спосіб ЛГМ за друкованою моделлю з вентканалами, реалізація якого стала можливою завдяки застосуванню комп'ютерних систем, дозволив використання вакууму ливарної форми для відсмоктування газів по видрукованим каналам за алгоритмом «чим більше газів від газифікації ливарної моделі, тим інтенсивніший спосіб потрібний для їх видалення з ливарної форми», що дозволить замінити моделі з ППС на друковані і розширити номенклатуру виливків за друкованими моделями при ЛГМ, забезпечуючи стабільну якість литва. Це сприятиме виробництву широкої номенклатури виливків зі зниженням витрат при виготовленні 3D-друкованих ливарних моделей, особливо різноманітних одиничних чи дрібних партій виливків за індивідуальними замовленнями покупців. Останнє відповідає концепції «виробництво як послуга» (Manufacturing as a Service, MaaS).

Описаний спосіб служить засобом подолання основної перешкоди застосування друкованих моделей для ЛГМ, пов'язаної з їх більшою масою і газотвірністю, порівняно з моделями з ППС. Адаптація ливарного виробництва до адитивних технологій дозволяє за допомогою мережі Інтернет пряму взаємодію з покупцем товару, який проектується за його індивідуальним цифровим проектом, зокрема через NFC-систему (бездротової передачі даних та платежів). Також таке поєднання нових цифрових процесів з традиційними виробничими скорочує часовий розрив від створення прототипів і інструментів до масового виробництва.

### Висновки

Адитивні технології виробництва дозволяють змінювати як конфігурацію ливарної продукції, так і конструкцію ливарних моделей виключно за рахунок внесення змін в цифрову модель продукції без наступного переформатування виробничого базису. Завдяки розкриття потенціалу застосування комп'ютерних систем для проектування та 3D-друку ливарної моделі з вентиляційними каналами було розроблено один із способів ЛГМ за друкованими моделями, що відповідає зростаючому тренду цифровізації і автоматизації ливарних процесів. Виконання таких каналів в друкованій моделі дало можливість підвищити інтенсивність евакуації продуктів газифікації цієї моделі у ливарній формі з використанням вакууму форми. Це дозволяє отримати сумарну вигоду як від достатньо швидкоплинних 3D-процесів виготовлення ливарної моделі, так і від короткотривалих процесів формовки та вибивки виливків завдя-

ки використанню при ЛГМ форм з сухого піску. При цьому цифрова трансформація ЛГМ поєднується з ресурсоефективністю оборотного застосування формувальних матеріалів без зміни діючих стандартів контролю металопродукції ливарних цехів, а адаптація виробництва до адитивних технологій дозволяє за допомогою мережі Інтернет взаємодію з покупцем товару, який проектується за його індивідуальним цифровим проектом. Також таке поєднання нових цифрових процесів з традиційними виробничими скорочує часовий розрив від створення прототипів, пілотних зразків продукції і інструментів до масового виробництва.

#### Список літератури

- [1] Кабінет Міністрів України. (2021, лип. 21). *Постанова № 750. Щодо сприяння впровадженню технологічного підходу «Індустрія 4.0»*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/750-2021-%D0%BF#Text>.
- [2] В. М. Коржик, М. П. Лютик, В. Ю. Хаскін і В. Ю. Шевченко. «Спосіб вирощування (3D-друку) об'ємних (тривимірних) виробів із тугоплавких матеріалів», *Патент України 118616. МПК В29С 64/153, В33У 10/00, В22F 3/105, В23К 26/342*. 11.02.2019.
- [3] М. О. Васильєв В. П. Бевз, К. М. Храновська. «Спосіб тривимірного друку металевого виробу», *Патент України 93424. МПК В41N 1/00, В41М 99/00*. 25.09.2014.
- [4] О. Й. Шинський, В. С. Дорошенко. «Спосіб лиття металу за адитивно виготовленими разовими ливарними моделями, що газифікуються у вакуумованих формах з сипкого піску, з окисленням продуктів газифікації», *Патент України 150121. МПК В22С 7/02, В22С 9/04*. 05.01.2022.
- [5] П. Б. Калюжний, І. А. Шалевська, О. В. Нейма, С. О. Кротюк, В. С. Дорошенко. «Спосіб лиття металу за 3D-друкованими моделями, що газифікуються у вакуумованих формах з сипкого піску», *заявка України u202305216. МПК В22 С7/02, В22С 9/04*. 3.11.2023.
- [6] М. Miller. «Why Lost Foam?», *Modern Casting*, no. 8, pp. 41-42. 2020.

Стаття надійшла: 22.11.2023 р.

#### References

- [1] Cabinet of Ministers of Ukraine. (2021, July 21). Resolution No. 750. Regarding promoting the implementation of the technological approach "Industry 4.0". Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/750-2021-%D0%BF#Text>. [in Ukrainian].
- [2] Pat. 118616 UA, IPC B29C 64/153, B33U 10/00, B22F 3/105, B23K 26/342, Method of growing (3D-printing) volumetric (three-dimensional) products from refractory materials, Korzyk V. M., Lyutyk M. P., Haskin V. Yu., Shevchenko V. Yu., Publ. 11.02.2019. [in Ukrainian].
- [3] Pat. 93424 UA, IPC B41N 1/00, B41M 99/00, Method of three-dimensional printing of a metal product, Vasiliev M. O., Bevs V. P., Khranovska K. M., Publ. 25.09.2014. [in Ukrainian].
- [4] Pat. 50121 UA, IPC B22C 7/02, B22C 9/04, Method of casting metal using additively produced one-time foundry models that are gasified in vacuumed forms from loose sand, with oxidation of gasification products, Shinsky O. Y., Doroshenko V. S., Publ. 05.01.2022. [in Ukrainian].
- [5] Pat. Appl. u202305216 UA, IPC B22C7/02, B22C9/04, Method of metal casting according to 3D-printed models, which are gasified in vacuum molds from loose sand, Kalyuzhny P. B., Shalevska I. A., Neyma O. V., Krotiyuk S. O., Doroshenko V. S., Publ. 3.11.2023. [in Ukrainian].
- [6] M. Miller. «Why Lost Foam?», *Modern Casting*, no. 8, pp. 41-42. 2020.

#### Відомості про авторів

**Дорошенко Володимир Степанович** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу фізико-хімії ливарних процесів.

**Янченко Олександр Борисович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри галузевого машинобудування.

V. S. Doroshenko<sup>1</sup>, O. B. Yanchenko<sup>2</sup>

## APPLICATION OF COMPUTER SYSTEMS FOR DESIGNING AND 3D PRINTING OF A FOUNDRY PATTERN WITH VENTILATION CHANNELS IN ITS WALLS

<sup>1</sup>Physical-technological Institute of Metals and Alloys, of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

<sup>2</sup>Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia