

Особливості конструювання моделей для їх 3D-друкування і наступної газифікації в ливарній формі

Досліджено способи оптимізації і удосконалено процес лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ), з розробкою методів застосування для ЛГМ 3D-друкованих моделей. Порожністі оболонкові друковані полімерні моделі конструктори виконують такими у прагненні наблизити їх за масою до моделей з пінополістиролу (ППС) таким способом, що їх серцевини друкують як тонкі розпірки, які запобігають деформації стінок моделі та забезпечують газопроникність моделі для виводу газів крізь трубку випора за межі форми для нейтралізації газів методом спалювання. Виведення надлишку газів за межі форми для моделей з можливо більшою питомою вагою, ніж із ППС, відкриває шлях до запобігання негативних наслідків, які ці гази можуть спричинити в процесі лиття. Особливістю є те, що підпірки для друку оболонок бажано друкувати так, щоб їх застосувати як розпірки між оболонковими стінками моделі, або розпірки робити вставками простої геометричної форми з ППС. Стінки моделі, які не мають порожнини, слід друкувати з газовідвідними каналами або виконувати в них направлену пористість моделі знизу вгору (при розташуванні моделі в ливарній формі) з результируючим виводом газів крізь випор з запальником на його виході. Наведено приклади виготовлення моделей, що випалюються, з застосуванням адитивної технології та виливків, що отримані за такими моделями. Друковані моделі мають високу чистоту поверхні та можуть виконуватись складної конфігурації. Нерідко вигідніше видрукувати одну модель замість виконаних традиційними технологіями кількох частин, з яких збирають рівноцінну друкованій модельну конструкцію. За приведеними схемами основних операційних циклів з прикладів виготовлення разових моделей на етапі технологічної підготовки при запусканні у виробництво нових виливків видно переваги у швидкості отримання перших виливків за 3D-друкованими моделями, порівняно з моделями, отриманими в традиційній оснастці.

Ключові слова: лиття за моделями, що газифікуються; 3D-друк; адитивне виробництво; разові моделі; нейтралізація газів; газопроникність; порівняння технологій.

Процес ЛГМ (Lost Foam Casting Process) у вакуумованих формах з сухого піску, дозволяє отримувати недорогі металеві виливки, другі за низьким рівнем собівартості від отримуваних в сирих піщано-глинистих формах. Але ЛГМ має значно ширшу сферу застосування в діапазоні за масою виливків 0,2–5000 кг і вище та вигідніше для разового-дрібно-серійного лиття (що домінує в Україні), точності виливків і охоплює зону лиття за моделями, що витоплюються, і у форми з холоднотвердних сумішей.

Проблема у загальному вигляді полягає у слабкому застосуванні досить універсального ЛГМ, недостатньому розкритті потенціалу цього процесу, особливо сприятливого до цифровізації як основи формування нового вигляду ливарного виробництва.

Аналізуючи історію застосування в ливарних цехах ЛГМ-процесу, практично можна сказати наступне: «що йому допомагає, те йому і вадить». Мова йде

про модель з ППС. Якщо разова модель з ППС досконало визначає геометрію і високу точність розмірів виливка, спрощує формовку в сухому піску з його вібрацією протягом 1–2 хв без масивних енергоємних формувальних машин, за рахунок тиску газів від газифікації моделі дозволяє зміцнювати вакуумовану піщану форму під час заливки металу і його тверднення, то до її недоліків можна віднести небажаний вплив продуктів газифікації (газових і твердих вуглецевих залишків) на якість виливка (при некоректному техпроцесі) та виділення газів в повітря цеху, що псує умови праці і шкодить довкіллю (при порушенні умов вентиляції і нейтралізації шкідливих газів).

В якості прикладу 3D-друку полімерних моделей на рис. 1 зображено моделі лопатей крильчаток турбіни [1], що були виготовлені як з порожниною, що утворюється при склейці моделі з двох половинок (а), так і цільними (в), цільні моделі знизу мають тонкі техноло-

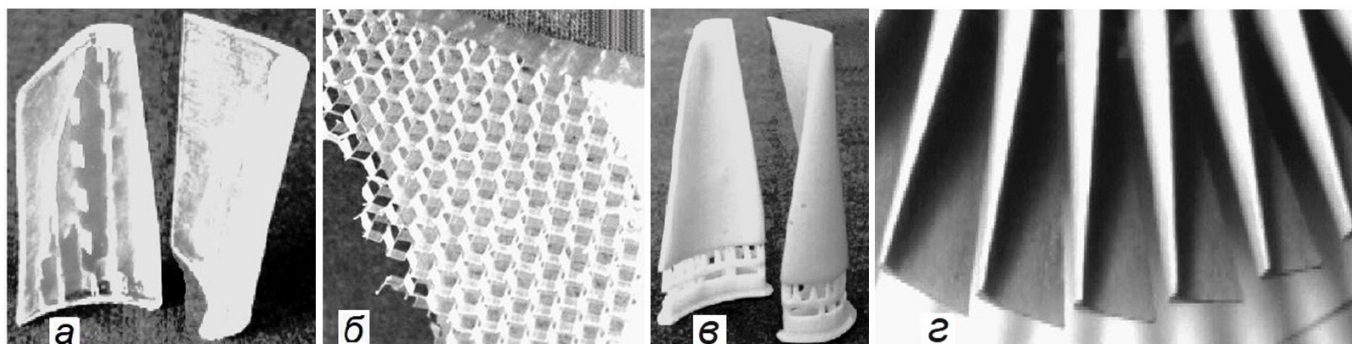


Рис. 1. 3D-друковані полімерні моделі: модель лопаті з двох половин-оболонок і порожниною, що утворюється після їх склейки (а); варіант каркасної структури внутрішніх розпірок для оболонок моделі (б); модель лопаті цільна (в); крильчатка з металевими лопатями, вилитими за моделями, що випаляються (г) [1]

гічні опори, необхідні для друку. Показано варіант серцевини оболонкової моделі (б) у вигляді комірчастих розпірок (каркасу) для утримання зовнішніх оболонок склеєної моделі (а), що важливо при наступних операціях виготовлення форми без деформації порожнистої моделі. Також показано приклад крильчатки (г) з металевими лопатями, вилитими в оболонкові піщані форми за друкованими моделями, що випаляються.

3D-друкування полімерних моделей є одним із кроків переходу ливарного виробництва до епохи Індустрії 4.0, яка характеризується ознаками кіберфізичного перетворення від цифрового (зображення чи креслення на комп'ютері) до фізичного (об'єкту чи твердотілого виробу), яке ще називають цифро-фізичним перетворенням (digital-to-physical conversion) [2]. Простими словами, вже зараз і чим далі ливарник не стоїть біля печі з лопатою чи біля форми з трамбівкою, а працює за комп'ютером.

Водночас лиття металу за моделями (див. рис. 1), що випаляються (по типу способу Replicast), досить дорогий за вартістю процес, практично аналогічний литтю за моделями, що витоплюються, з багаторазовим нанесенням вогнетривких шарів на модель, їх тривалою сушкою при створенні керамічної оболонкової форми та витратами на випалення моделі з форми прожарюванням у печах і з нейтралізацією газів з цих печей.

На рис. 2, а [3] показано приклад заливання металом прожареної оболонкової форми, виконаної за надрукованою на 3D-принтері разовою моделлю, що витоплюється. Поруч (зліва біля форми) тримають факел для запалювання газів, що будуть виходити з прямокутних отворів у верхній частині форми, яка обрамляє надливи. Рис. 2, б демонструє високі якості і чистоту поверхні технічних деталей, вилитих з нержавіючої сталі аналогічним способом в компанії Alerph Objects у формах за друкованими моделями [3].

Значно нижча була б собівартість виливків за технологією лиття за друкованими моделями, що газифікуються (ЛГМ) в вакуумованій ливарній формі з сипкого піску, з якістю отриманих виливків, як на рис. 1, г чи 2, б. Але маса сучасних друкованих моделей на одиницю об'єму вища від моделей з ППС, відповідно, і твердий вуглецевий залишок, а також газотівність з ростом пікових тисків від можливої газифікації моделей у формі, що впливає на якість виливків.

Також для порожнистих моделей при затіканні у форму першого металу можливе різке збільшення тиску газу від термодеструкції моделі через дію теплового випромінювання на внутрішню поверхню значної площі зсередини полімерної оболонкової моделі. При цьому модель швидко руйнується без поступового виділення газу, порівняно з відносно рівномірним тиском для суцільних моделей з ППС, що



а



б

Рис. 2. Заливання металом прожареної оболонкової форми: а – за моделлю, що надруковано на 3D-принтері; б – крупний план литих деталей за 3D-друкованими моделями [3]

загрожує появою браку литва. Тому моделі адитивного виробництва зараз випаляють з форм перед їх заливанням.

Метою цієї статті є опис науково-технологічної розробки процесу ЛГМ з використанням 3D-друкованих моделей, що виготовлені у вигляді таких технологічних конструкцій, які наближають лиття до відпрацьованого процесу ЛГМ (з ППС-моделями). Водночас при цьому бажано зменшити вірогідність появи надмірно високого тиску газу у формі і нейтралізувати можливі викиди газу за межі ливарної форми.

Під керівництвом проф. О.Й. Шинського нині проводиться цикл науково-технологічних досліджень у ФТІМС НАН України для розробки методів ЛГМ за друкованими моделями. Такі конструкції порожнинних моделей з гладкими зовнішніми оболонками і внутрішніми розпірками чи каркасом доопрацьовують для мінімізації: 1) витрат на 3D-друк, 2) пікових газових виділень від полімеру високої газотвірності (зокрема вибором легковагих полімерів низької газотвірності) і 3) об'єму викидів газу в повітря цеху від газифікації моделі. При цьому в процес ЛГМ включено деяку особливість, що властива вакуум-плівковій формовці, – поєднання порожнини моделі (форми) з повітрям цеху крізь канали в моделі та їх продовження трубчастими випорами. Тоді надлишкові газовиділення (у тому числі бурхливі чи пікові) від газифікації моделі виводяться на верхню поверхню форми, де газ підпалюють для знешкодження їх згорянням [4].

Застосування вакуумування піщаної форми, що притаманне ЛГМ, забезпечує відкачування частини газів від термодеструкції (газифікації) моделі крізь пісок форми вакуумним насосом, який підключають до цієї контейнерної форми. Кількість цих відкачених газів залежить від газопроникності протипригарної фарби, що наносять на модель, а також величини розрідження, що забезпечує вакуумний насос. Відпрацювання технології надійного спалення газів на поверхні форми дозволить мінімальну кількість продуктів газифікації пропускати крізь пісок, щоб його не забруднювати конденсатом, що утворюється на поверхні піщинок від проходження цих газів. При цьому відпрацьований охолоджений пісок потребує мінімального очищення і придатний для багатократного повторного використання при виготовленні ливарних форм.

При друкуванні моделей на 3D-принтері також особливістю є те, що підпірки для друку оболонок (які необхідні як підкладки для друкування у просто-

рі, як на рис. 1, в) бажано виконувати так, щоб вони при складанні двох оболонок ставали розпірками між оболонковими стінками моделі. А стінки моделі, які виготовляють без порожнини, слід друкувати з газовідвідними каналами або виконувати в них направлену пористість моделі знизу вгору (при розташуванні моделі в ливарній формі) з результирующим виводом газів крізь канал випору з запальником на його виході.

Також пропонується застосування прямокутних вставок з ППС (з густиною не вище $\sim 20 \text{ кг/м}^3$) замість розпірок, або відоме [5] виготовлення вставок з подібного ППС за формою друкованих оболонок, на які вони опираються. Тоді разова модель виглядає як модель (болванка-опора) з ППС, облицьована тонкими 3D-друкованими оболонками. Приклад такої фігурної декоративної моделі показано на рис. 3, де модель з серцевиною із ППС має наклеєну оболонку з полімеру PLA (а), ця ж оболонка на ППС-основі покрита фарбою (б), заливання металом виготовленої форми за цією моделлю при ЛГМ (в). Таким способом виливок (г) отримано як з чорних, так і з кольорових сплавів [5]. Характерно, що такий декоративний виливок складної геометрії з гладкою поверхнею вигідно отримати з друкованою оболонкою та без механічної обробки застосувати, наприклад, для прикрашення сходів з фігурними литими балюстрадами.

3D-друк часто дозволяє створювати такі конструкції моделей, які з ППС можливо виготовити лише з кількох частин, що дає економію на збиранні моделей і зростанні точності моделі. Також комп'ютерне програмне забезпечення 3D-друку значно прискорює технологічну підготовку виробництва. Якщо традиційне виробництво може тривати тижнями до випуску першої моделі виливка з виготовленням відповідної оснастки, то програмна підготовка для 3D-друку займає дні до виготовлення моделі без паперової документації і оснастки для моделі виливка, а також часто з оптимізацією на комп'ютері конструкції майбутнього виливка з оптимальним розміщенням його у ливарній формі і проектуванням найбільш сприятливого режиму заливання розплавом металу цієї форми. На рис. 4 [6] зображено процес оптимізації на комп'ютері

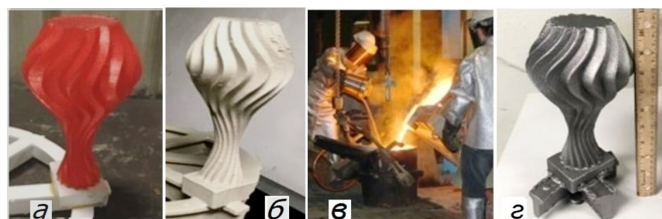


Рис. 3. ЛГМ-процес з моделлю, що має 3D-друковану оболонку і серцевину з ППС: а – модель з друкованою оболонкою; б – пофарбована модель; в – заливання прожареної форми; г – готовий виливок як частина декоративної конструкції

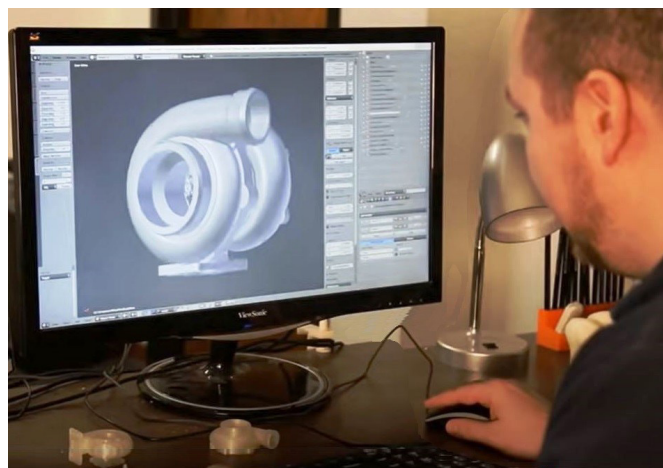


Рис. 4. Процес оптимізації конструкції модельного кластера з двох моделей, внизу під монітором лежать друковані моделі

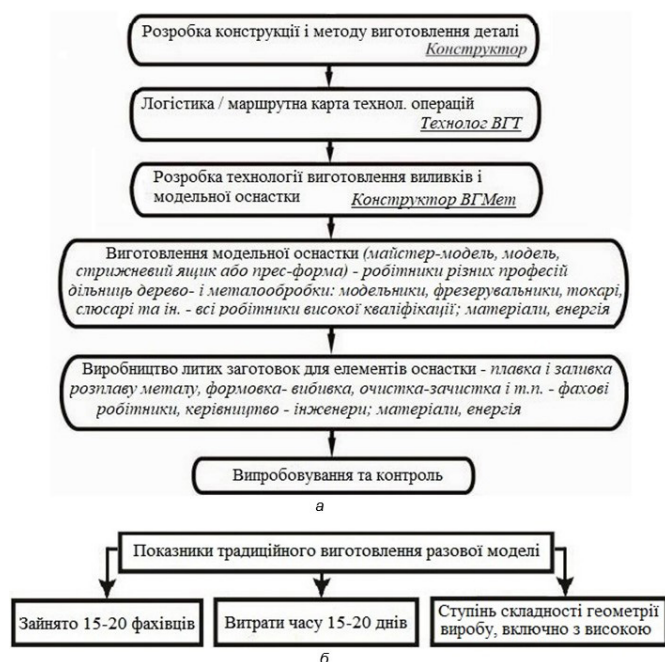


Рис. 5. Схеми: а – традиційної технології виготовлення модельної оснастки; б – основні складові витрат і можливості такої технології при виготовленні разової моделі за цією оснасткою

конструкції кластера з двох видруктованих моделей (такий кластер поміщують у піщану форму) для виливків, аналогічних показаним на рис. 2, б.

На рис. 5 і 6 [7] показано приклади схем етапів для порівняння технологій виготовлення модельної оснастки і разової моделі, що випадає в керамічній оболонковій формі, традиційним способом (рис. 5, а) і 3D-друком (рис. 6, а) для виробництва першої (сигнальної) литої деталі в цеху спеціального машинобудування. А також показано відповідні схеми (рис. 5, б і рис. 6, б) основних складових витрат, зокрема кількість зайнятих фахівців, витрат часу на виготовлення таких моделей та можливості технології щодо складності литої конструкції. Витрати на матеріал моделі не враховано, бо його застосовують в обох випадках. Витрати на модельну оснастку можуть мати варіанти як для опочної форми, так і для оболонкової форми. Видно значні переваги у часі 3D-друку

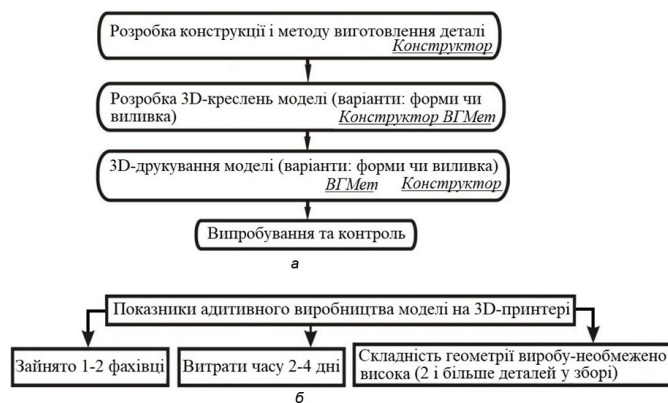
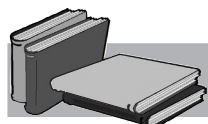


Рис. 6. Схеми: а – адитивної технології виготовлення модельної оснастки; б – основні складові витрат і можливості такої технології

на етапі технологічної підготовки і виготовлення моделей литих деталей точного машинобудування при однакових операціях формовки і лиття.

Висновки

Таким чином, удосконалення ЛГМ-процесу виконано шляхом розробки конструкції 3D-друкованої моделі з мінімально можливою об'ємною вагою і, відповідно, газотвірністю, гладкою поверхнею, переважно оболонкової конструкції з внутрішніми розпірками (або вставками з ППС простої геометричної форми), які бажано поєднати з технологічними опорами для друку. Модель важливо виконати повністю вентильованою з порожнинами чи каналами вздовж всієї конструкції з виводом газів крізь канали випорів на поверхню форми для нейтралізації методом спалювання надлишкових викидів газу. За наведеними схемами основних операційних циклів з прикладів виготовлення разових моделей на етапі технологічної підготовки при запусканні у виробництво нових виливків видно переваги у швидкості отримання перших виливків за 3D-друкованими моделями, порівняно з моделями, отриманими в традиційній оснастці (прес-формах). А застосування ЛГМ-процесу додатково зменшить тривалість формовки і витрати на неї.

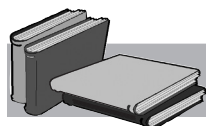


ЛІТЕРАТУРА

- Митраков Г.Н., Евдокимов С.Н., Лаврик Е.Г. и др. Использование аддитивных технологий при литье по выжигаемым моделям. Омский научный вестник. 2015. № 2. С. 80–84.
- Industry 4.0: How to navigate digitization of the manufacturing sector. McKinsey Digital (2015). URL: https://www.mckinsey.de/files/mck_industry_40_report.pdf
- Benefits of 3D Printing for Investment Casting. Mar 01, 2019. URL: <https://www.engineering.com/story/benefits-of-3d-printing-for-investment-casting>
- Патент 147217 Україна, МПК: B22C 7/02, B22C 9/04. Спосіб лиття металу за моделями, що газифікуються, з окисленням продуктів газифікації / О.Й. Шинський, В.С. Дорошенко. Опубл. 24.04.2021, Бюл. № 16.

5. Sarah Jordan, Mark DeBruin. Additive Manufacturing Evaporative Casting. *Materials Science and Technology*. 2017. October 8–12. P. 281–288.
6. 3D Print Patterns For Investment Casting. 20.02.2019. URL: <https://www.lulzbot.com/learn/tutorials/3d-print-patterns-investment-casting>
7. Ахмедова Ш.А. Традиционные и аддитивные технологии в производстве деталей машин. *Universum: технические науки*. 2021. № 11 (92). С. 34–37. URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/12579>

Надійшла 27.12.2021



REFERENCES

1. Mitrakov, G.N., Evdokimov, S.N., Lavrik, E.G. et al. (2015). The use of additive technologies in casting for burned-out models. *Omskij nauchnyj vestnik*, no. 2, pp. 80–84 [in Russian].
2. Industry 4.0: How to navigate digitization of the manufacturing sector. McKinsey Digital (2015). URL: https://www.mckinsey.de/files/mck_industry_40_report.pdf
3. Benefits of 3D Printing for Investment Casting. Mar 01, 2019. URL: <https://www.engineering.com/story/benefits-of-3d-printing-for-investment-casting>
4. Patent of Ukraine no. 147217. IPC: B22C 7/02, B22C 9/04. Method of metal casting according to gasified models with oxidation of gasification products, O.I. Shynskiy, V.S. Doroshenko, opubl. 24.04.2021, Bull. no. 16 [in Ukrainian].
5. Sarah Jordan, Mark DeBruin (2017). Additive Manufacturing Evaporative Casting. *Materials Science and Technology*. October 8–12, P. 281–288.
6. 3D Print Patterns For Investment Casting. 20.02.2019. URL: <https://www.lulzbot.com/learn/tutorials/3d-print-patterns-investment-casting>
7. Akhmedova, Sh.A. (2021). Traditional and additive technologies in the production of machine parts. *Universum: tekhnicheskie nauki*, no. 11 (92), pp. 34–37. URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/12579> [in Russian].

Received 27.12.2021

Summary

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

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

Features of designing patterns for their 3D printing and subsequent gasification in the mold

Methods of optimization and casting of gasified patterns (Lost Foam Casting Process, LFCP) have been studied, with the development of methods for the application of 3D printed patterns for LFCP. The hollow shell printed polymer patterns are designed by designers in an effort to bring them closer in weight to expanded polystyrene (EPS) patterns in such a way that their cores are printed as thin spacers, which prevent deformation of the pattern walls and ensure gas permeability for neutralization of gases by combustion. Taking excess gases out of shape for patterns with as much specific weight as possible than EPSs paves the way for preventing the negative effects that these gases can cause during casting. The peculiarity is that it is desirable to print the supports for printing shells so that they can be used as spacers between the shell walls of the pattern, or spacers to make inserts of simple geometric shape with EPS. The walls of the pattern, which have no cavity, should be printed with exhaust ducts or perform in them directed porosity of the pattern from the bottom up (when the pattern is in the mold) with the resulting output of gases through the vapor with the igniter at its outlet. Examples of production of fired patterns with the use of additive technology and castings obtained from such patterns are given. Printed patterns have a high surface cleanliness and can be performed in complex configurations. It is often more profitable to print one pattern instead of several parts made by traditional technologies, from which an equivalent printed pattern design is assembled. The given schemes of the main operating cycles from the examples of making one-time patterns at the stage of technological preparation at the launch of new castings show advantages in the speed of obtaining the first castings on 3D printed patterns compared to patterns obtained in traditional equipment.

Keywords

Lost Foam Casting Process; 3D printing; additive manufacturing; one-time patterns; gas neutralization; gas permeability; comparison of technologies.