

УДК 621.74.045

П.Б. Калюжний, канд. техн. наук, заст. директора;

e-mail: kpb.ptima@gmail.com; ORCID 0000-0002-1111-4826.

В.С. Дорошенко, д-р техн. наук, пров. наук. співроб.;

e-mail: doro55v@gmail.com; ORCID 0000-0002-0070-5663

О.В. Нейма, мол. наук. співроб.; e-mail: neima_alex@ukr.net;

ORCID 0000-0001-5438-7253

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

ЛИТТЯ ЗА КОМБІНОВАНИМИ ПОЛІМЕРНИМИ МОДЕЛЯМИ, ЩО ГАЗИФІКУЮТЬСЯ

У сучасному світі у виробничі технології проникає цифровізація. Зокрема, для ливарного виробництва цифрову інтелектуалізацію обладнання та процесів називають «Foundry 4.0». У роботі досліджено спосіб лиття чавуну за моделями, що газифікуються (ЛГМ, Lost Foam Casting) та попередньо виготовлені комбінованим способом. Моделі патрубків виготовлено з пінополістиролу (ППС), на них частково нанесено кільця, що були надруковані на 3D-принтері з чотирьох різних матеріалів. Аналіз отриманих виливків показав їх доволі високу якість, окремі виливки мали лише дрібні поверхневі дефекти, що усуваються обробкою поверхні чи доопрацюванням процесу ЛГМ. Експеримент проведено під керівництвом проф. О.Й. Шинського з успішним результатом, який показав перспективність для ЛГМ застосування комбінованих моделей із ППС і друкованими пластиковими елементами. Експериментально виявлено, що пластикові елементи можуть застосовуватися для виконання певної конфігурації виливка чи його частин складного профілю. Крім того, друковані елементи моделі, які виготовлені з пластику, що містить до 30 % металу, можуть бути застосовані для локального легування чи модифікування металу виливка. Запропоновано заходи щодо виведення продуктів деструкції пластику з ливарної порожнини при литті за комбінованими моделями за технологією ЛГМ. Швидке автоматизоване 3D-виготовлення моделей (навіть складної чи разової конструкції за індивідуальним замовленням) та за ними — металевих виливків усе більше відповідатиме новим термінам «підключена цифровізація», «виробництво як послуга» та «послуга на вимогу».

Ключові слова: 3D-технології; 3D-друк; лиття за моделями, що газифікуються; вакуумна форма; разова модель; комбінована модель.

У сучасному світі у виробничі технології проникає цифровізація. Так, зокрема, для ливарного виробництва цифрову інтелектуалізацію обладнання й процесів називають «Foundry 4.0» [1]. Серед ливарних технологій ЛГМ — лиття металу за моделями, що газифікуються, є чи не найбільш сприятливою до цифровізації та автоматизації виробництва технологією. Щоб зменшити час і витрати на перехід від креслення до разової моделі для ЛГМ, дослідники вивчають можливість повного усунення потреби в оснастці для виготовлення разових моделей шляхом прямого їх друкування. При цьому прогнозується, що без досить дорогих металевої модельної оснастки й обладнання, що нині традиційно застосовується для формотворення моделі, за друкованою моделлю металеві виливки можуть бути виготовлені впродовж кількох годин [2].

Також ми стикаємось із проблемами суміщення чи взаємного доповнення різних технологій, що також називають гібридизацією технологій. Сьогодні це відбувається при впровадженні цифровізації в діючі ливарні цехи, що є прогнозованою «вимогою

часу» для росту конкурентоздатності й автоматизації їх виробництва. Питання полягає в тому, чи можливо реалізувати підхід, так би мовити, «найкраще з обох світів» [3], у якому переваги традиційних і новітніх процесів дають синергійний результат. Варто зазначити, що доля залізовуглецевих сплавів у світовому випуску виливків сягає 80 %, а чавунних виливків — понад 70 % [4]. Отже, важливо поширити 3D-технології саме для виробництва виливків із таких найбільш затребуваних сплавів. Також ці сплави достатньо освоєні в цеховій практиці ЛГМ. Крім того, 3D-друк готових металевих виробів із залізовуглецевих сплавів або ще не відпрацьований для промислового застосування, або якість і собівартість таких виробів поки що помітно програють наявним ливарним процесам, забезпеченим чинними стандартами. Тому найбільш простим і актуальним напрямком виготовлення металопродукції ливарного сегмента є поєднання нового цифрового з наявними ливарними процесами.

3D-друк ливарних моделей для лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ), відкриває перспективи отримання моделей складної геометрії, які навіть неможливо було б виготовити у прес-формах чи вирізанням із пінополістиролу (ППС) на 3D-фрезерах. При збиранні таких моделей із деталей цільні друківані моделі дають зменшення кількості компонентів і операцій складання, мають високі чистоту поверхні (вищу порівняно з пористими чи піноподібними виробами з ППС) і точність, дають менше відходів, одночасно спрощуючи сам процес точного лиття. Про виготовлення у вітчизняній практиці декоративних виливків із чавуну за друківаними моделями при ЛГМ вже повідомлялося раніше [5].

Проте нині для технічних ливарних виробів друківані моделі ще не досягли рівня, придатного для ЛГМ, не доведено технологію друку моделей низької питомої ваги до рівня, конкурентного з моделями із ППС та низькою зольністю при газифікації у ливарній формі під час заливання в неї металу. Тому за кордоном ллють метал головним чином способом QuickCast за друківаними моделями, що випаляються в печах із багат шарових керамічних форм, які виготовляють подібно до лиття за моделями, що витоплюються. Технологія QuickCast запатентована компанією 3D Systems (<https://www.3dsystems.com>). Вона полягає у створенні на поверхні друківаної моделі багат шарової (до семи шарів) оболонкової форми, що повинна пройти процес із багатьма операціями сушіння (як правило, після кожного нанесеного прошарку) і кінцеве прожарювання без утворення тріщин [6], уникнення яких, як основного з можливих дефектів, важливе для такого виду лиття. Тому виготовлення оболонкової форми може тривати не менше кількох днів із застосуванням спеціальних недешевих матеріалів і ступінчастих режимів нагрівання. Цей спосіб значно дорожчий за вартістю виливків (порівняно із ЛГМ), енергоємніший і триваліший за часом саме через виготовлення таких форм із періодичним сушінням та прожарюванням їх у печах.

Для виготовлення литих виробів, що містять складні за конфігурацією елементи, які можна виготовити лише засобами 3D-друку, ефективним рішенням може бути застосування комбінованих разових моделей. У такому випадку основна геометрично проста частина моделі виготовляється з ППС відомими методами, а складна — друкується із пластику на 3D-принтері.

Метою даної роботи була експериментальна перевірка способу лиття металу за газифікованими комбінованими моделями, що поєднують пінополістирольну основу та полімерну частину, яка виготовляється за допомогою 3D-друку.

Для проведення експериментальних досліджень у відділі проф. О.Й. Шинського було виготовлено моделі з ППС у вигляді патрубків (порожнистих циліндрів) із розмірами, мм: зовнішній діаметр $D = 50$, внутрішній діаметр $d = 30$, довжина $l = 150$ мм. Маса патрубка із ППС — 5,8 г (при густині ППС 30 кг/м³). Із застосуванням 3D-принтера KLEMA 250 (з об'ємом камери друку 250 x 250 x 350 мм) методом пошарового наплавлення FDM (Fused Deposition Patterning) було надруковано кільця (рис. 1) таких діаметрів, мм: зовнішній $D_k = 52,6$; внутрішній $d_k = 50$; довжина $l_k = 30$ із чотирьох видів пластиків PLA, HIPs, PLA+Al, PLA+Cu. Маси (г) таких кілець становили 7,79; 6,61; 7,88 і 8,52 відповідно.

При виборі пластиків враховували їхні властивості, вартість та екологічність. HIPS — пластик, відомий як ударостійкий полістирол із температурою плавлення 230 °С, густиною 1050 кг/м³. Полілактид (PLA) — термопластичний поліефір, що є одним із найширше використовуваних термопластиків. PLA має густиною 1240 кг/м³, температуру плавлення 150–160 °С, питому теплоту плавлення 93 кДж/кг, температуру кипіння 227 °С. Металізований пластик PLA+Al складається з 70% PLA-пластику і 30% порошкового алюмінію, має температуру плавлення 160 °С, густиною 1290 кг/м³. Металізований пластик PLA+Cu має температуру плавлення 160 тетафториду °С, густиною 1400 кг/м³.

Друківані пластикові кільця було насаджено на пінополістиролові патрубки так, щоб вони розміщалися на середині висоти моделі. До моделей було припаяно живильники та випарники, а моделі зібрано у блок (кластер) (рис. 2), на який нанесено водне протипригарне покриття на основі дистенсиліманіту.

Модельний блок формували в сухому кварцовому піску, як при традиційному ЛГМ, у вакуумованих формах, що тривало протягом кількох хвилин. Заливали форму рідким чавуном (температура ~1400 °С), що відповідає марці СЧ200 ДСТУ EN 1561:2010. Вибір чавуну зумовлений тим, що рідкий чавун легше отримати з вищим перегрівом над лінією ліквідус і при цьому він довше залишається у ливарній формі в рідкому стані, порівняно зі сталлю, яка, хоч і має вищу температуру заливання, але в багатьох випадках швидше утворює поверхневу кірку металу. Одержані дослідні виливки показано на рис. 3.

Результати експерименту показали, що всі пластики газифікувалися і метал повністю заповнив пояски на патрубках, де розміщувалися полімерні кільця. На виливку з HIPS-кільцем на пояску спостерігаються певні поверхневі дефекти (дрібні пори), що усуваються обробкою поверхні чи доопрацюванням процесу лиття.

Повздовжнє розрізання патрубків (рис. 3, б) показало, що метал в зоні поясків усіх виливків є щільним, тобто внутрішні раковини чи поруватість відсутні. Лише на внутрішній поверхні патрубків спостерігались поодинокі дефекти у вигляді дрібних наростів на поверхні металу висотою в долю міліметра через просічення піщаної форми. Однією з причин їх утворення міг бути надмірний тиск газів, які утворюються при газифікації пластику чи внаслідок реакції металевих наповнювачів пластику з рідким чавуном. Такі дефекти можна усунути створенням направленої пористості моделі (як напр., за патентом [7]), підбором протипригарного покриття моделі тощо.

Цей дослід засвідчив, що пластикові елементи із PLA і HIPS можуть газифікуватися,

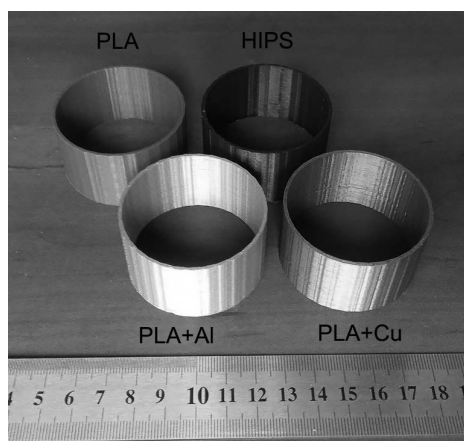


Рис. 1. Кільця, друківані з пластиків: PLA, HIPS, PLA+Al, PLA+Cu

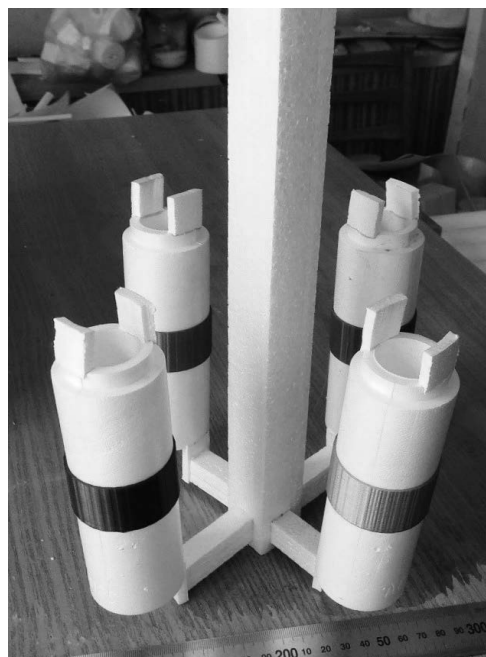
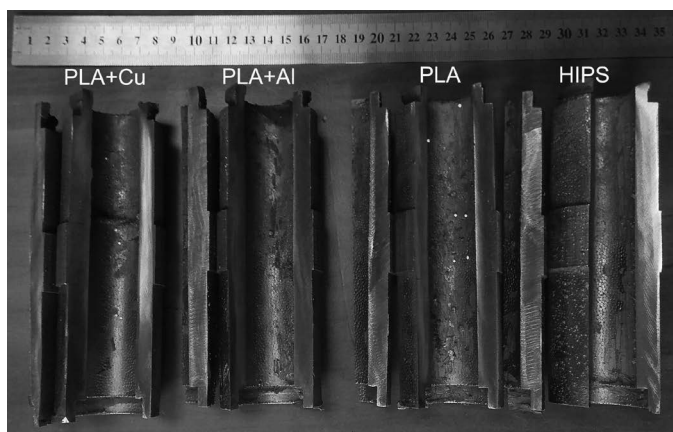


Рис. 2. Дослідні моделі з пластиковими кільцями, зібрані в блок



а



б

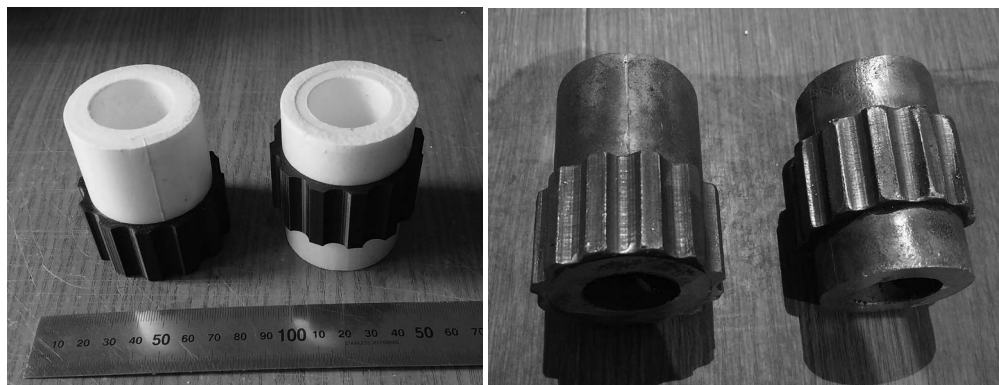
Рис. 3. Виливки після очищення (а) та виливки, розрізані для контролю якості (б)

якщо їх маса перевищує майже в 1,5 рази масу пінополістирольної основи моделі. У випадку металізованих пластиків маса пластику, яка мала газифікуватися, менша за загальну масу елемента, оскільки металева складова (порошок) не газифікується. Для порошоків металів (у даному випадку Al і Cu) відбуваються процеси плавлення-розчинення у розплаві (чавуні), що може чинити модифікуючу чи легуючу дії в локальних об'ємах виливка.

Для перевірки можливості газифікації полімерних елементів із більшою масою було проведено дослід. Для цього з пластику PLA надруковано кільця з внутрішнім діаметром 50 мм і довжиною $l_k = 30$ мм, масою 11,4 г. Зовнішня поверхня друкованого кільця мала обриси шестерні. Указані елементи були надруковані з 20% заповненням внутрішнього об'єму, а їх умовна густина становила 650 кг/м^3 . Ці пластикові кільця було насаджено на пінополістирольні циліндри такого самого діаметру, як і в попередньому досліді, але довжиною 70 мм. Кільця розміщено в середині висоти моделі та їх нижній частині (рис. 4). У стінках пінополістирольних циліндрів зроблено вертикальні вентиляційні канали діаметром 3 мм, які закрили випарниками. Моделі зібрано в блок, на який нанесено протипригарне покриття. Модельний блок формувався в сухому кварцовому піску у вакуумованій формі, яку заливали рідким чавуном СЧ200, як при традиційному ЛГМ.

Результати експерименту показали, що на обох моделях друковані пластикові елементи газифікувалися, і метал їх замістив. На виливках практично не спостерігалось

поверхневих дефектів, що їх могли б спричинити гази, які утворюються при газифікації пластику — термічній деструкції при заливанні форми рідким чавуном. У виливку, в якому кільце розміщене посередині, верхні та нижні «грані» кільця мали заокруглені краї. Очевидною причиною їх формування є рідкі продукти термодеструкції пластику, які перешкоджали чавуну повністю заповнити ливарну порожнину.



а

б

Рис. 4. Комбіновані полімерні моделі (а) та дослідні виливки (б)

Запобігти утворенню таких дефектів можна шляхом створення направленої пористості моделі, підбором протипригарного покриття моделі відповідної газопроникності тощо. Також можливе виконання на зовнішній поверхні пінополістиролового циліндра (під пластиковими елементами) повздовжніх каналів розмірами (мм) в перерізі приблизно 5×5 ; вони можуть мати вигляд поверхневих рівчаків. У тілі моделі з ППС виконують (пропалюванням чи свердленням) повздовжній вентиляційний канал, який поєднують принаймні з одним із каналів у тілі патрубка. Вентиляційні канали закривають випарниками із ППС, які не фарбують і які теж можуть мати повздовжній вентиляційний канал. Таким чином, модель отримає направлену вентиляцію знизу вгору, чим буде досягнуто вирівнювання тиску газів по висоті моделі під час заливання форми металом. А відсутність фарби на випорі сприятиме впливу вакууму форми (ефект засмокткування) на винесення у випор можливих сажових продуктів із металу патрубка.

Проведені дослідження показують, що комбіновані моделі з ППС і окремими пластиковими друкованими елементами газифікуються в ливарній формі при литті чавуну, а тому можуть використовуватися для ЛГМ при виготовленні виливків із чавуну та (з високою імовірністю) й з інших металів із температурою їх заливання не нижчою, ніж у чавуну. При цьому ймовірність повної газифікації пластику і, відповідно, якість виливка буде залежати від умовної густини пластикового елемента та співвідношення його об'єму до об'єму ППС основи моделі.

Висновки

Проведені у відділі проф. О.Й. Шинського дослідження показують перспективність застосування комбінованих моделей із ППС і пластиковими елементами. Ці елементи можуть застосовуватись для виконання певної конфігурації виливка чи його частин складного профілю. Крім того, друковані елементи моделі, виготовлені з пластику, що містить до 30% металу, можуть бути застосовані для локального легування чи модифікування металу виливка. Запропоновані технологічні заходи з покращення видалення продуктів деструкції пластикових елементів із зони контакту «метал-модель» сприятимуть підвищенню якості виливків, що виготовляються за технологією ЛГМ. Швидке автоматизоване 3D-виготовлення моделей (навіть складної чи разової конструкції за індивідуальним замовленням) і за ними — металевих виливків усе більше відповідатиме новим термінам «підключена цифровізація», «виробництво як послуга» та «послуга на вимогу».

Список літератури

- 1 Foundry 4.0 Using FRP-Driving the Digital Transformation. *Foundry Reviev*. 2017. No. 7. P. 4–5.
- 2 Marshall Miller. Why Lost Foam? *Modern Casting*. 2020. No. 8. P. 41–42.
- 3 Dirk Lehmhus. Advances in Metal Casting Technology: A Review of State of the Art, Challenges and Trends. Part I *Metals*. 2022. No. 12 (11). 1959.
- 4 Гнатуш В.А., Дорошенко В.С. Тренди світового ринку металевих виливків. *Процеси лиття*. 2022. № 2. С. 63–70.
- 5 Дорошенко В.С. 3D-друкована полімерна модель для газифікації у форм. Нові матеріали і технології в машинобудуванні — 2021: Матеріали XIII міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 28–29 квіт. 2021). Київ, 2021. С. 77.
- 6 3D Printing for Investment Casting. URL: <https://www.uniontech3d.com/3d-printing-investment-casting.html>.
- 7 Патент № 91224 Україна, МПК В22С 9/02. Спосіб формування за разовими моделями / О.Й. Шинський, В.С. Дорошенко, О.В. Нейма. Опубл. 25.06.2014, Бюл. № 12.

Надійшла 10.04.2023

References

- 1 Foundry 4.0 Using FRP-Driving the Digital Transformation. *Foundry Reviev*. 2017. No. 7. P. 4–5.
- 2 Marshall Miller. Why Lost Foam? *Modern Casting*. 2020. No. 8. P. 41–42.
- 3 Dirk Lehmhus. Advances in Metal Casting Technology: A Review of State of the Art, Challenges and Trends. Part I *Metals*. 2022. No. 12 (11). 1959.
- 4 Gnatush V.A., Doroshenko V.S. (2022). Trends in the world market of metal castings. *Casting Processes*. № 2. P. 63–70 [in Ukrainian].
- 5 Doroshenko V.S. (2021, April). 3D developed polymer pattern for gasification in the mold New materials and technologies in machine-building — 2021. XIII International Scientific Conference. P. 77. Kyiv [in Ukrainian].
- 6 3D Printing for Investment Casting. URL: <https://www.uniontech3d.com/3d-printing-investment-casting.html>.
- 7 Doroshenko V.S. (2021, April). 3D developed polymer pattern for gasification in the mold New materials and technologies in machine-building — 2021. XIII International Scientific Conference. P. 77. Kyiv [in Ukrainian].

Received 10.04.2023

P.B. Kaliuzhnyi, PhD (Engin.), Deputy Director;

e-mail: kpb.ptima@gmail.com; ORCID 0000-0002-1111-4826

V.S. Doroshenko, Dr. Sci. (Engin.), Leading Research Scientist;

e-mail: doro55v@gmail.com; ORCID 0000-0002-0070-5663

O.V. Neima, Junior Researcher; e-mail: neima_alex@ukr.net;

ORCID 0000-0001-5438-7253

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

CASTING OF COMBINED POLYMER PATTERNS THAT ARE GASIFIED

In today's world, digitalization penetrates production technologies, in particular, for foundry production, the digital intellectualization of equipment and processes is called "Foundry 4.0". The paper examines the method of casting cast iron according to patterns that are gasified (Lost Foam Casting, LFC) and pre-made by a combined method. The nozzle patterns were made of expanded polystyrene (EPS), partially covered with rings that were printed on a 3D printer from four different materials. The analysis of the obtained castings showed their sufficiently high quality, individual castings had only minor surface defects, which are eliminated by surface treatment or refinement of the LFC process. The experiment was conducted under the guidance of prof. O.Y. Shinskyi with a successful result, which showed the prospects for the use of combined patterns with PPS and printed plastic elements for LFC. It was experimentally found that plastic elements can be used to perform a certain configuration of casting or its parts with a complex profile. In addition, printed pattern elements, which are made of plastic containing up to 30% metal, can be used to locally alloy or modify the casting metal. Measures for the removal of plastic degradation products from the foundry cavity during casting using combined patterns using LFC technology are proposed. Rapid automated 3D production of patterns (even of complex or one-off designs by individual order) and metal castings based on them will increasingly correspond to the new terms "connected digitalization", "production as a service" and "service on demand".

Keywords: 3D technologies; 3D printing; Lost Foam Casting; vacuum mold; disposable pattern; combined pattern.