

О.В. Михнян, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: mixnyan@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-3210-4173>

О.В. Нейма, наук. співр., e-mail: neima_alex@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5438-7253>

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

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

Вектори розвитку адитивного виробництва та приклад його застосування при литті за моделями, що газифікуються

Аддитивні технології вважаються основою промислової революції XXI століття, тому вітчизняним науково-технологічним інститутам та інноваційним виробництвам варто активно розвивати цей напрям, щоб ліквідувати вже наявне відставання від наукоємних економік світу. Описано прогнозовані основні напрями розвитку та впровадження в промисловість і наше повсякдення адитивного виробництва (АВ), інформація про які підвищує нашу орієнтацію в цьому потоці високих технологій і які водночас сприятимуть модернізації ливарних процесів. Для найбільш простого і вигідного впровадження АВ в ливарному виробництві діючих цехів рекомендовано процес лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ), зокрема шляхом розробки і реалізації способів друку легковагих моделей з відходів пінополістиролу (ППС). При ЛГМ витрати на формовку в сухому вакуумованому піску чи не найнижчі з усіх відомих ливарних способів. Описано створений спосіб друку полімерних ливарних моделей, в якому за двоетапним режимом виготовляють циліндричні заготовки-стрижні, з яких потім отримують філамент для діючого принтера. Такі типи 3D-принтерів для друку з філаменту найбільш поширені і недорогі за вартістю. Полістирол, отриманий з відходів ППС і витрачений на друк моделей, має мінімальну зольність, що сприятиме забезпеченню якості виливків, виготовлених методом ЛГМ. Для ЛГМ-процесу з друкованими моделями створено два способи лиття, що відрізняються від традиційних методів, описаних В.С. Шуляком. Пропонується разову модель вивести за межі піщаної форми за допомогою трубчастого випору і тим самим уможливити вихід надмірної кількості газів від її газифікації в повітря цеху. Але при цьому слід встановити електричні запальники над отвором випорів і нейтралізувати гази від моделі шляхом їх спалення. Друковані моделі слід виготовляти з суцільним повздовжнім каналом чи порожниною (оболонкова модель, можливо з розпірками) і за аналогією з V-процесом модель функціонально розглядати як синтетичну товсту плівку, якою облицьовано поверхню піщаної форми.

Ключові слова: адитивне виробництво, модель, відходи пінополістиролу, 3D-друк, лиття за моделями, що газифікуються, філамент, нейтралізація газів.

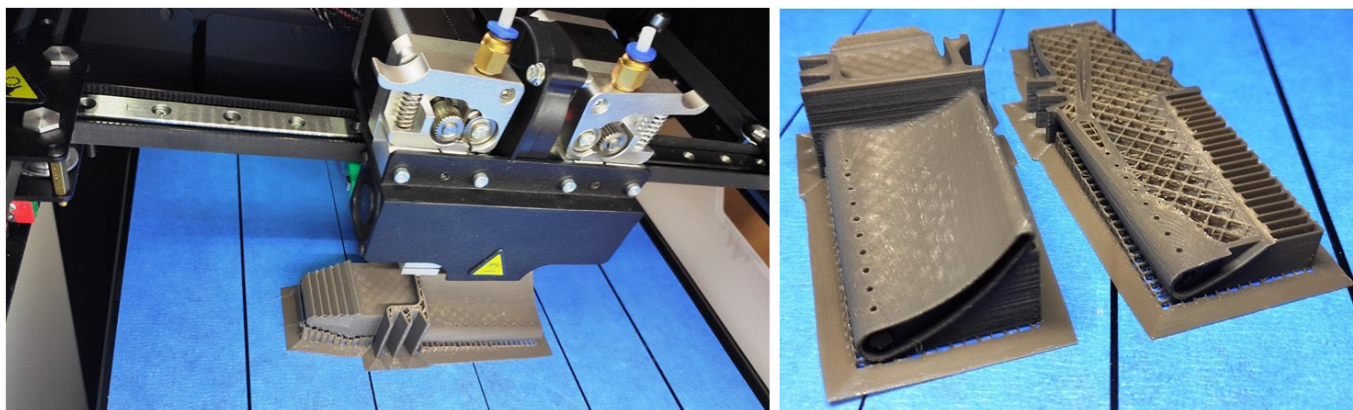
Аддитивні технології вважаються основою промислової революції XXI століття, тому вітчизняним науково-технологічним інститутам та інноваційним виробництвам варто активно розвивати цей напрям, щоб ліквідувати вже наявне відставання від наукоємних економік світу. Коли стереолітографію було винайдено більше 30 років тому, чи хтось міг би здогадатися, що технологія 3D-друку «вибухне», пошириться і змінить спосіб виготовлення виробничих деталей? Ймовірно, ні.

Представники наукової школи ливарних процесів проф. Шинського О.Й. останні 10 років мають ряд оглядових публікацій і патентів стосовно промислового використання 3D-друку в ливарному виробництві та проводять за цією темою експериментальні дослідження (рисунок). І хоча деякі проблеми навколо адитивного виробництва (АВ) за цей час залишилися незмінними, технології, матеріали та застосування зросли в геометричній прогресії. Прогнози свідчать [1], що це зростання триватиме, хоча, можливо, в інших напрямках, ніж досі.

Про те, як зміниться АВ в наступне десятиліття [1], сайт www.additivemanufacturing.media подає 6 ідей чи векторів, описаних нижче. Також доповнимо ці прогнози відносно адаптації АВ до ливарного виробництва.

1. Спрощення виробництва запасних частин призведе до реорганізації всього життєвого циклу продукту. 3D-друк має великий потенціал як джерело вторинного ринку та запасних частин, але лише якщо для цих деталей існують файли для 3D-друку. У майбутньому ми будемо менше покладатися на 3D-сканування та зворотну інженерію, оскільки такі цифрові файли існуватимуть із самого початку та створюватимуться як частина початкової розробки продукту.

2. Все частіше виникатимуть «нестандартні» та органічні (біонічні) конструкції. Існує певна міра, до якої сьгоднішні дизайнери та інженери утримуються від використання АВ в повній мірі геометричних можливостей просто тому, що споживачі та користувачі 3D-друкованих виробів повинні відчувати довіру та



Процес 3D-друку моделей газотурбінного двигуна (ГТД) у ФТІМС НАН України та друківані моделі; показано внутрішню комірчасту структуру частково друківаної моделі (справа на фото)

визнання до цих об'єктів. В міру того, як люди звикнуть до генеративно розроблених і оптимізованих за топологією конструкційних форм, відкриються двері для все більш складних, асиметричних і оптимізованих об'єктів, чи то аерокосмічні кронштейни, чи то компоненти автомобільних двигунів, чи то споживчі товари.

3. Поява нової категорії промислового цеху (ферми), що спеціалізується на АВ металевих деталей. АВ все глибше впроваджується в ливарне виробництво (особливо на стадії підготовки виробництва нової номенклатури виливків), взаємодоповнюючи та часом витісняючи сьгоднішні ливарні процеси і модифікуючи їх під ефективні цифрові технології. Деталі АВ відрізняються від заготовок чи металевих виливків, з якими більшість машинних цехів звикли працювати. На горизонті з'являється новий клас обробних і складальних цехів, укомплектованих та обладнаних для кріплення, сканування, оброблення та контролю часто «неправильних» деталей, реалізація яких можлива за допомогою 3D-друку.

4. Більше використання матеріалів, притаманних АВ. 3D-друк дозволяє зберігати матеріал, стимулюючи використання матеріалу лише там, де це необхідно, також все більше підтримує використання градієнтних матеріалів, поєднання (комбінування) різних матеріалів та композитів. Ці можливості ставлять під сумнів уявлення про те, що одна деталь повинна бути виготовлена з одного матеріалу, і забезпечать більш інноваційний дизайн і краще заощадження цінних матеріалів. Розширення можливостей для екологічно чистих матеріалів із біологічних чи придатних до утилізації вторинних джерел також стимулює поширення таких матеріалів, наприклад, заявка на патент [2].

5. Винахідники як нова категорія виробників. Сьгодні існує жорстка грань між розробкою продукту та виробництвом, яка часто перепиняє рух від проєктування та ідеї до можливого виробництва за допомогою будь-якого методу лиття, механічної обробки чи іншого традиційного методу. Не так з АВ; без застосування механічних інструментів дизайн продукту може продовжувати змінюватися, навіть коли виріб надходить у виробництво – і винахідник може продовжувати брати участь, навіть бути виробником за допомогою 3D-друку.

6. Нові види 3D-друку, які ми ще не уявляли. Лише минулий рік виявив кілька несподіваних засобів проєктування деталей шар за шаром, зокрема АВ способом нарощування знизу завдяки випромінюванню від екрана, що на дні ванни з чутливим до тверднення від світла рідким полімером. Не можна сказати, що наступні десять не можуть додати наступних варіантів. Методи 3D-друку, які сьгодні тільки розвиваються, є лише зародком ідеї або, можливо, взагалі ще не існують, можуть стати наступним важливим кроком прогресу АВ у наступному десятилітті.

Інноваційні 3D-технології все активніше сприяють формуванню нового вигляду ливарного виробництва, тому поточні дослідження ФТІМС НАН України нерідко включають до своїх розділів цю високотехнологічну тематику. 3D-друк або АВ – це виготовлення деталі безпосередньо з її комп'ютерного файлу автоматизованого проєктування (computer-aided design, CAD).

Сьгодні найдешевшим способом застосування 3D-друку, насамперед у вітчизняному ливарному виробництві, без збільшення собівартості виливків в діючих цехах є друківання полімерних моделей для їх газифікації у піщаній формі при литті металу за методом ЛГМ, бо при ЛГМ витрати на формовку в сухому вакуумованому піску чи не найнижчі з усіх відомих ливарних способів. 3D-принтери для полімерних виробів наразі наявні на вітчизняному ринку практично в десятках моделей і цінових значень, також полімерний філамент – нитка для друківання постачається по імпорту декількох видів.

Розглянемо деякі проблеми застосування АВ для ЛГМ та планування досліджень для їх вирішення, зокрема мова йде про виготовлення філамента для 3D-друку ливарних моделей з відходів пінополістиролу. Увагу до цієї теми викликало те, що маса сучасних друківаних моделей на одиницю об'єму вища від традиційних моделей з пінополістиролу (ППС), відповідно, і газотвірність з ростом пікових тисків утворюваного газу від спроб їх газифікації у ливарній формі. Також друківані моделі мають більші (ніж моделі з ППС) твердий залишок і зольність, які при їх газифікації у формі нальотом покривають поверхню форми та погіршують якість виливків. Тому друківані моделі дуже мало застосовують для ЛГМ за традиційною технологією через вказані перешкоди.

Зарубіжні компанії зараз роблять лише перші дослідження для створення легкоплавких матеріалів для 3D-друку разових моделей, газифікація яких могла б наближатись до моделей з ППС. А тим часом застосовують спосіб лиття за друківаними моделями, що випаляються (прожарюванням у печах) з керамічної оболонки з кількох вогнетривких шарів подібно до технології лиття за моделями, що витоплюються, з досить високою собівартістю литва, властивою цим обом зазначеним технологіям.

З метою створення способу АВ ливарних моделей (та будь-яких тривимірних об'єктів) для переведення з процесу лиття за 3D-друкованими моделями, що випаляються, на більш економну технологію ЛГМ у вакуумованих формах з сипкого піску нами розроблено спосіб виробництва моделей для ЛГМ з відходів ППС за місцем їх утворення як метод їх утилізації [2]. Це науково-технологічне рішення обґрунтовано результатами наших досліджень і полягає в тому, що в способі АВ ливарних моделей, який включає процес витікання формотвірного матеріалу із сопла, переміщуваний в просторі за заданою програмою траєкторією, в якості формотвірного матеріалу патентується застосування розплаву подрібнених відходів ППС. Також в якості подрібнених відходів придатне застосування відходів чи стружки при виготовленні фрезеруванням виробів з ППС на верстатах з числовим програмним управлінням (ЧПУ) (3D-фрезерах), а також термокомпактовані відходи ППС [3].

Матеріал ППС за своїми техніко- і фізико-хімічними показниками давно відпрацьований для ЛГМ, має мінімальний вуглецевий залишок. Його відходи мають низькі показники міцності і твердості, тому їх легко дробити чи молоти. Після придбання відділом проф. Шинського О.Й. 3D-принтера (див. рисунок), що друкує філаментом, перспективними стають відпрацювання в лабораторії режимів отримання з сипких подрібнених відходів ППС філаменту і експериментальні роботи по друкуванню з нього легковагих моделей для ЛГМ оптимальної конструкції.

Для експериментального виготовлення філаменту з ППС в невеликій кількості для лабораторних випробувань розробляється спосіб отримання нитки філаменту охолодженням в воді тонкого струменя розплаву, який, наприклад, виходить з сопла клейового пістолету, як найпростіший варіант такого виготовлення філаменту за умов, що отвір сопла додаткової насадки звужено відповідно до заданої товщини філаменту. Такі пістолети (з живленням від електромережі 220 V) серійно випускаються для з'єднання деталей розплавом полімеру з температурою 120–150 °С. В цей пістолет заправляють клейові стрижні діаметром 11,2 мм і нагрівають їх подачею електроживлення на ТЕН в нагрівальній камері, дотичної до сопла. Серійно випускаються також пістолети для клейових стрижнів Ø12,0 мм та з нагріванням до 200 °С.

При цьому передбачено спроектувати та виготовити лабораторний пристрій для виготовлення стрижнів Ø11,2–12,0 мм, в якому з подрібнених відходів ППС, що подаються на вході, на виході під тиском крізь нагріте сопло виходив би струмінь розплаву полістиро-

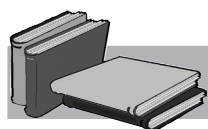
лу відповідного діаметра. Для спрощення конструкції в якості робочого органу імпровізованого екструдера можливо застосувати шнек, зокрема від м'ясорубки.

Також при виконанні цих експериментальних робіт корисно використати численні розробки А.О. Стрюченка з утилізації відходів ППС для регулювання експлуатаційних властивостей стрижнів і філаменту. Якщо ці виплавлені вироби будуть надто ламкими, то для здатності змотування їх на котушку для 3D-принтера їх пластичність можна збільшувати дозованим додаванням у ці відходи скипидару (як ефективного пластифікатора) чи розчину ППС у ньому [4]. Також це може бути одним із способів регулювання властивостей отриманих моделей.

Крім того, для ЛГМ з моделями підвищеної маси, зокрема спеціально для 3D-друкованих моделей, у 2021–2022 рр. відділом фізико-хімії ливарних процесів проф. Шинського О.Й. розроблено два способи лиття металу. В першому способі застосовано примусову вентиляцію порожнини форми за рахунок подання від компресора потоку повітря в зазор між моделлю і дзеркалом металу в процесі газифікації моделі [5]. При цьому потік повітря сприяє окисленню продуктів моделі. А в другому – застосовано принципи вакуумно-плівкової формовки (ВПФ, V-процес) з утворенням порожнини моделі, що має посилену (з вектором вертикального спрямування) вентиляцію за рахунок відповідного відношення величин діаметрів випорів і стояка, що характерно для способу ВПФ [6]. При цьому модель друкують з суцільним повздовжнім каналом чи порожниною (оболонковою, можливо з розпірками) і за деякою аналогією з ВПФ модель функціонально розглядають як синтетичну (досить товсту) плівку, якою облицьовано поверхню піщаної форми. В обох випадках, оскільки гази від термострукції здатні виходити за межі форми крізь випор, над його отвором ставлять електричний запальник для допалювання цих газів.

Висновки

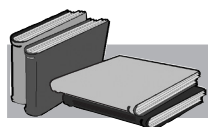
Таким чином, описано прогнозовані основні напрями розвитку та впровадження в промисловість і наше повсякдення адитивного виробництва, які водночас сприятимуть модернізації ливарних технологій. Як найбільш просте і вигідне впровадження АВ в ливарному виробництві рекомендовано його застосування в технології ЛГМ, зокрема шляхом розробки способів друку легковагих моделей з ППС, а також екологічно безпечних процесів газифікації таких моделей у вакуумованому піску ливарної форми з підвищенням рівня якості литва, порівняно з виливанням у поширені форми з піщаних сумішей зі зв'язувальним компонентом.



ЛІТЕРАТУРА

1. Hendrixson S. 6 Ways Additive Manufacturing Will Change in the Next Decade. 11.02.2022. URL: <https://www.additivemanufacturing.media/articles/6-ways-additive-manufacturing-will-change-in-the-next-decade>
2. Заявка u202105814 Україна, МПК: МПК8 В22С 9/02, В22С 15/02, В29С47/78. Спосіб адитивного виробництва полістирольної ливарної моделі чи іншого тривимірного об'єкту складної конфігурації / О.Й. Шинський, В.С. Дорошенко, П.Б. Калюжний, О.В. Михнян, О.В. Нейма. Подано 18.10.2021.
3. Шинский О.Й., Тихонова О.А., Стрюченко А.А., Дорошенко В.С. Исследование процессов термокомпактирования отходов пенополистирола. *Твердые бытовые отходы*. 2011. № 4. С. 48–50.
4. Патент 9003 Україна, МПК С08J 3/02, С08F 12/00, В22С 1/16. Застосування живичного скипидару як розчинника для відходів пінополістиролу / О.Й. Шинський, Є.В. Терліковський, А.О. Стрюченко, І.О. Шинський, Ю.Ю. Ладарева. Опубл. 15.09.2005, Бюл. 9.
5. Патент 147217 Україна, МПК В22С 7/02, В22С 9/04. Спосіб лиття металу за моделями, що газифікуються, з окисненням продуктів газифікації / О.Й. Шинський, В.С. Дорошенко. Опубл. 24.04.2021, Бюл. № 16.
6. Патент 150121 Україна, МПК В22С 7/02, В22С 9/04. Спосіб лиття металу за адитивно виготовленими моделями, що газифікуються у вакуумованих формах з сипкого піску, з окисненням продуктів газифікації / О.Й. Шинський, В.С. Дорошенко. Опубл. 05.01.2022. Бюл. № 1.

Надійшла 04.03.2022



REFERENCES

1. Hendrixson, S. 6 Ways Additive Manufacturing Will Change in the Next Decade. 11.02.2022. URL: <https://www.additivemanufacturing.media/articles/6-ways-additive-manufacturing-will-change-in-the-next-decade>
2. Application u202105814 Ukraine, IPC B22C 9/02, B22C 15/02, V29S47/78. Method of additive production of polystyrene foundry model of other three-dimensional object of complex configuration / O.Y. Shynskiy, V.S. Doroshenko, P.B. Kaliuzhnyi, O.V. Mikhnyan, O.V. Neima, podano 18.10.2021 [in Ukrainian].
3. Shynskiy, O.Y., Tikhonova, O.A., Stryuchenko, A.A., Doroshenko, V.S. (2011). Study of the processes of thermal compaction of polystyrene waste. *Tverdye bytovye otkhody*, no. 4, pp. 48–50 [in Russian].
4. Patent 9003 Ukraine, IPC C08J 3/02, C08F 12/00, B22C 1/16. Use of gum turpentine as solvent for waste of foam polystyrene / O.Y. Shynskiy, Y.V. Terlikovskiy, A.O. Striuchenko, I.O. Shynskiy, Yu.Yu. Ladareva, opubl. 15.09.2005, Byul. 9 [in Ukrainian].
5. Patent 147217 Ukraine, IPC B22C 7/02, B22C 9/04. The method of casting metal for models that are gasified, for oxidizing gasification products / O.Y. Shynskiy, V.S. Doroshenko, opubl. 24.04.2021, Byul. 16 [in Ukrainian].
6. Patent 150121 Ukraine, IPC B22C 7/02, B22C 9/04. Method of metal casting according to additively made models gasified in vacuum forms from loose sand with oxidation of gasification products / O.Y. Shynskiy, V.S. Doroshenko, opubl. 05.01.2022. Byul. no. 1 [in Ukrainian].

Received 04.03.2022

Summary

O.V. Mikhnyan, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: mixnyan@ukr.net,
<https://orcid.org/0000-0003-3210-4173>

O.V. Neima, Researcher, e-mail: neima_alex@ukr.net,
<https://orcid.org/0000-0001-5438-7253>

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)*

Vectors of development of additive production and an example of its application in casting on gasified patterns

Additive technologies are considered to be the basis of the industrial revolution of the XXI century, so domestic scientific and technological institutes and innovative industries should actively develop this area to close the existing gap with the science-intensive economies of the world. The forecasted main directions of development and implementation in industry and our daily additive manufacturing (AM) are described, information about which increases our orientation in this flow of high technologies and which will also contribute to the modernization of foundry processes. For the simplest and most profitable implementation of AM in the foundry production of existing shops, the Lost Foam Casting (LFC) process is recommended, in particular by developing and implementing methods for printing lightweight patterns of expanded polystyrene (EPS) waste. In LFC process, the cost of molding in dry vacuum sand is perhaps the lowest of all known foundry methods. The created method of printing polymer foundry patterns is described, in which cylindrical rod blanks are made in a two-stage mode, from which a filament for an operating printer is then obtained. These types of 3D printers for printing from filament are the most common and inexpensive. Polystyrene, obtained from EPS waste and spent on printing patterns, has a minimum ash content, which will help ensure the quality of castings grown by the LFC method. Two methods of casting have been created for the LFC process with printed patterns, which differ from the traditional methods described by V.S. Shulyak. It is proposed to bring the one-time pattern out of the sand form with the help of a tubular outlet and thus allow the release of excessive gases from its gasification into the air of the shop. But you should install electric lighters over the hole of the evaporators and neutralize the gases from the pattern by burning them. Printed patterns should be made with a continuous longitudinal channel or cavity (shell pattern, possibly with spacers) and by analogy with the V-process, the pattern should be functionally considered as a synthetic thick film, which is lined with sandy surface.

Keywords

Additive production, pattern, expanded polystyrene waste, 3D printing, Lost Foam Casting, filament, gas neutralization.