

УДК 681.3 / 621.74 / 339.97

В. С. Дорошенко, д-р техн. наук, старш. наук. співроб.,
e-mail: doro552gmail.com; ORCID: 0000-0002-0070-5663

П. Б. Калюжний, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.,
e-mail: kpb.ptima@gmail.com; ORCID: 0000-0002-1111-4826

С. В. Коломійцев, аспірант, e-mail: 0507032994@ukr.net;
ORCID: 0000-0002-1698-6594

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

ПРИКЛАДИ 3D-ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА МЕТАЛОВИРОБІВ І ПОЛІМЕРНИХ МОДЕЛЕЙ

В статті наведено приклади 3D-друку (адитивного виробництва, АВ) металовиробів і виробничих ферм, що мають можливості друку ливарних моделей. 3D-друк ідеально справляється з дрібносерійним виробництвом і все більше буде застосовуватися в ливарних процесах для виготовлення моделей, особливо разових, для точного лиття металу. Діючі ферми підприємств АВ слугуватимуть прикладами для організації майбутніх централізованих виробництв, на яких ливарникам можна замовити полімерні моделі чи навіть піщані форми, або прикладами ділень АВ як підрозділів ливарних цехів. Останнім часом зростає популярність фотополімерних 3D-принтерів, які друкують з високою продуктивністю за технологією формування моделі з рідкого фотополімеру. Ливарно-металургійні процеси звісно наявні в АВ металовиробів, яке не може обходитись без наплавлення чи сплавлення шарів чи часток металу, а АВ все більше присутнє в темах інформацій і описах досліджень галузевих ливарних журналів та сайтів світу. Разом з АВ металевих виробів 3D-друк модельно-формуальної оснастки все більше спрощуватиме логістику поставок, наближаючи металеві чи полімерні деталі до місця збирання кінцевих виробів, їх ремонту, модернізації чи виробництва металовиробів за формоутворюючою оснасткою, включаючи ливарне. Швидко АВ відкриває перспективи розширення можливостей як по геометрії виробів, так і скороченню в рази (порівняно з традиційним виробництвом, що застаріває) тривалості технологічної підготовки і витрат на неї. Адитивні технології роблять процес топологічної оптимізації конструкцій найбільш ефективним, дозволяючи виробляти легковагі конструкції, що в ряді випадків нагадують форми природнього походження. Загалом, розвиток АВ призводить до того, що все більше речей та процесів матеріального світу будуть з'являтися шляхом «виробництво як послуга».

Ключові слова: 3D-друк, адитивне виробництво, АВ, ливарне виробництво, ливарні моделі, дизайн, виробничі ферми АВ, легковагі конструкції

Останніми роками досягнення 3D-друку (адитивного виробництва, АВ) все більше стали розповсюджуватись на деталі кінцевого використання [1]. Прогноз SmarTech Analysis показує, що до 2029 р., зокрема, 3D-друк в автомобільній промисловості (як одного з найбільших секторів використання АВ) принесе \$9 млрд доходу лише від виробництва кінцевих деталей проти \$1,39 млрд у 2019 р. Порів-

Нові методи та прогресивні технології лиття

нюючи з традиційним виробництвом, АВ скорочує фазу проектування нового продукту, що є ключовим у будь-якій галузі. На цьому етапі 3D-друк замінює навіть дороге і тривале виробництво ЧПУ, дозволяючи дизайнерам швидше пройти ряд ітерацій, перш ніж прийняти рішення про кінцевий продукт. Це виглядає так: як тільки дизайнери визначили потреби користувача та генерували ідеї для їх задоволення, вони розробляють прототип. Наступний етап – випробування цього прототипу для поліпшення його конструкції. Метод 3D-друку дозволяє додатково оптимізувати процес проектування-випробування особливо тих виробів, для виготовлення яких потрібна дорога і складна оснастка. Приклади від компанії Volkswagen AG (рис. 1).



Рис. 1. Металеві 3D-друковані патрубки-роз'єми для двигуна Audi W12 [1]

Прагнення до інноваційної продукції в конкурентному секторі, яким є автомобілебудування, стимулює збільшення продуктивності деталі, зокрема, шляхом зменшення її ваги (рис. 2, а) [1], як один із методів досягнення такої інноваційності при АВ. Можливість кастомізації (персоналізації за вимогами замовника) також викликає значний інтерес, особливо для виробників автомобілів класу люкс, а також для реконструкції ретро-автомобілів (рис. 2, б) [1].

Програмне забезпечення для промислового дизайну (CAD та CAM) нині значно вдосконалилося, включає генеративне проектування, оптимізацію топології та інструменти формування решіток в тілі конструкції, які зменшують загальну вагу

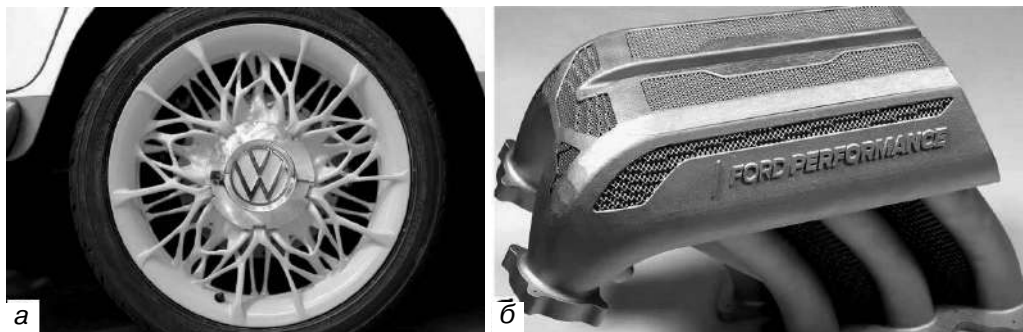


Рис. 2. Друковані легкі (зі «спицями») колеса мікроавтобуса Volkswagen 1962 р. (а) і колектор автомобіля Ford 1977 р. (б)

деталей, зберігаючи або покращуючи їх функціональність. Оскільки АВ майже не обмежене з точки зору свободи дизайну, на відміну від традиційних методів, складність деталі практично не є проблемою, що дозволяє об'єднання кількох деталей в єдину металоконструкцію завдяки АВ та спрощенню процесу складання тим більше, чим більша кількість деталей випускається АВ (рис. 3).



Рис. 3. Дизайнери General Motor об'єднали вісім різних компонентів кронштейна сидіння в єдину 3D-друковану деталь [1]

На сьогодні компанія Ford надрукувала понад 500000 деталей і заощадила мільярди доларів і мільйони годин роботи [1], в т. ч. інвестувавши у FDM, SLS та 3D-принтери друку піском для свого Центру передового виробництва в Детройті.

Інший приклад – у BMW Group за рік виготовили 300000 деталей 3D-друком, один з керівників компанії це прокоментував так: «Адитивне виробництво вже є невід'ємною частиною нашої всесвітньої виробничої системи і є невід'ємною частиною нашої стратегії цифровизації. У майбутньому нові технології такого типу пришвидшать виробництво і дозволять нам ще більше виграти від потенціалу виробництва без інструментів» [1]. Також компанії можуть скористатися перевагами АМ для спрощення логістики – скорочення ланцюгів поставок шляхом виробництва на місці та зменшення запасів деталей.

Матеріали для АВ можуть дозволити «вмістити» більшу кількість властивостей у кінцеві продукти. А при відході автопромисловості від двигунів внутрішнього згоряння, 3D-друк стає все більш ефективним рішенням для прискорення розробки більш легких деталей для електромобілів. Адже полегшення має вирішальне значення для конкурентоздатності електромобілів, оскільки воно безпосередньо впливає на збільшення часу роботи акумулятора [1].

Розвиток АВ полімерних виробів, до яких також відносяться моделі для ливарного виробництва, синхронно сприяв здешевленню принтерів і виникненню нових виробничих структур в цій галузі. АВ полімерних деталей зараз найбільш розповсюджене і рентабельне, оскільки широке застосування друку металів ще нерідко потребує вирішення проблем щодо забезпечення і контролю якості, зменшення собівартості, сертифікації продукції, виготовленої на новому обладнанні тощо [2], та для металовиробів близько 60 % часу іде на пост-обробку (термообробку, обробку тиском тощо). Ливарно-металургійні процеси звісно присутні при АВ металовиробів, яке не може обходитись без наплавлення чи сплавлення шарів чи часток металу, а АВ все більше присутнє в темах інформацій і описах досліджень галузевих ливарних журналів та сайтів світу.

Розглядаючи можливості 3D-друку для дрібносерійного виробництва, зокрема, полімерних моделей, в роботі [3] відзначається, що для цього передусім застосо-

вують настільні принтери з технологією друку FDM / FFF, з наявністю сотень тисяч принтерів такого друку у світі [2]. Настільний 3D-друк зародився близько 10 років тому, цю ідею розвинув чеський інженер Йозеф Пруша, який створив найбільшу ферму 3D-друку пластикових деталей з сумарним числом принтерів на його фабриці – до 1000 штук [3]. Самим бюджетним і відповідним для друку простих виробів типу моделей з таких пластиків, як PLA або PETG, є рішення на базі нескладних принтерів типу CrealityEnder-3, які встановлюють на стелажі (рис. 4, а).



а



б

Рис. 4. Ферми 3D-друку в Creality3D (а), а також в компанії 2050.AT (б) [3]

Переваги такого рішення: можливість швидко його розгорнути практично в будь-якому зручному місці, швидко збільшити кількість принтерів для зростання продуктивності ферми. Мінуси: неможливість друку інженерними пластиками, необхідність вручну знімати моделі, а також неможливість віддаленого моніторингу та контролю за друком [3].

Наступним рівнем організації дрібносерійного виробництва є ферма принтерів, здатних справлятися з максимально різноманітними завданнями, – ферма на базі 3D-принтерів типу Raise3DPro2, які оснащені двома екструдерами, закритою камерою і вбудованою веб-камерою для віддаленого моніторингу (рис. 4, б). На таких принтерах можна легко міняти номенклатуру моделей, що випускаються. До мінусів відносять високу вартість обладнання і необхідність знімати готові моделі вручну.

В нашому огляді приклади зображень діючих ферм наведено, як прообрази для організації майбутніх централізованих виробництв полімерних моделей, або дільниць АВ як підрозділів ливарних цехів. Якщо такі ферми, як виробничі структури, вже функціонують, то ливарникам можна брати їх за аналогії організації АВ у себе в цеху, або починати звикати до замовлень моделей на таких фермах. Зауважимо, що, згідно повідомлень з журналів чи сайтів ливарної тематики, швидкими темпами іде розробка, опробування і удосконалення відповідних модельних матеріалів для разових чи постійних ливарних моделей з оптимізацією їх характеристик відповідно до того чи іншого способу ливарного виробництва. З досліджень і розробок за такою тематикою нами запропоновано два способи виготовлення модельної чи формувальної оснастки, що буде описано в наступних публікаціях.

Ще одним варіантом створення ферми є приклад такої на базі принтерів з двома незалежними екструдерами типу IDEX [3]. На рис. 5, а показано подібну ферму на базі принтерів Raise3DE2. Таке рішення має додаткову перевагу, що підвищує продуктивність: кожен принтер може одночасно друкувати дві однакові моделі замість однієї. Недоліки ті самі: необхідність знімати моделі вручну і висока вартість самих принтерів.

Усуваючи останні недоліки, творці фабрик 3D-друку для автоматизації зняття моделей використовують коботи (коллаборативні роботи) [3, 4], які програмуються на зняття платформи (рухомої переносної полиць-підставки) разом з надрукованою моделлю і установку нової платформи для друку наступної моделі, після чого



Рис. 5. Ферма 3D-друку в компанії 3D.RU (а) і з застосуванням коботів (б) [3]

друк автоматично поновлюється (рис. 5, б). Це недешеве рішення, яке виправдано в країнах з високим рівнем оплати праці.

Останнім часом зростає популярність фотополімерних 3D-принтерів, які друкують з високою продуктивністю за технологією формування моделі з рідкого фотополімеру. Технологія дозволяє засвічувати весь шар відразу – таким чином принтер витрачає один і той же час на друк однієї чи будь-якої іншої кількості моделей, які входять в область побудови. Цього року було представлено принтери з великою областю друку і високою деталізацією, наприклад, принтер PhrozenSonicMega 8K (рис. 6) [3]

В даному випадку навіть один принтер є міні-фабрикою і здатний вирішувати серйозні виробничі завдання. Важливо відзначити, що, на відміну від FDM / FFF-принтерів, всі фотополімерні 3D-принтери від початку універсальні – дозволяють друкувати на них будь-якими наявними на ринку смолами або навіть тими, які з'являться в майбутньому.

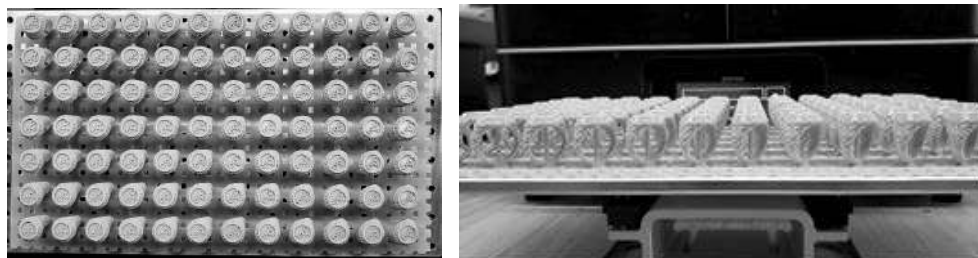


Рис. 6. Приклад друкованих виробів на принтері PhrozenSonicMega 8K протягом 3,5 години (у двох видах)

3D-друк ідеально справляється з дрібносерійним виробництвом і все більше буде застосовуватися в ливарних процесах для виготовлення моделей, особливо, разових для точного лиття. Для такого лиття виготовлення ливарних керамічних форм проводиться як за воскоподібними моделями, що виплавляються з кераміки, так і за моделями з більш твердого пластику, що видаляються з форм випалюванням. Застосування PLA пластику, як найдешевшого, екологічного та відновлюваного матеріалу (сировиною при його виробництві часто слугують відходи кукурудзи та сахарної тростини), є найперспективнішим для разових ливарних моделей. При цьому описані діючі ферми підприємств АВ послужать прикладами для організації майбутніх централізованих виробництв, на яких ливарникам можна замовити полімерні моделі чи навіть піщані форми, або прикладами діляниць АВ як підрозділів ливарних цехів.

Разом з АВ металевих виробів 3D-друк модельно-формуальної оснастки все більше спрощуватиме логістику поставок, наближаючи металеві чи полімерні де-

талі до місця збирання кінцевих виробів, їх ремонту, модернізації чи виробництва металовиробів за формоутворюючою оснасткою, включаючи ливарне. Швидке АВ відкриває перспективи розширення можливостей як по геометрії виробів, так і скороченню в разі (порівнюючи з традиційним виробництвом, що застаріває) тривалості технологічної підготовки і витрат на неї [1, 2]. Адитивні технології роблять процес топологічної оптимізації конструкцій найбільш ефективним, дозволяючи виробляти легковагі конструкції, що в ряді випадків нагадують форми природнього походження.

В цій статті ми навели приклади 3D-друку металовиробів і ферм, що мають можливості друку ливарних моделей, але така тенденція також поширюється і для АВ ливарних піщаних форм при литті в них деталей складної геометрії [5, 6], одержання яких було раніше неможливим через обмежені технічні можливості ливарних технологій. Загалом, розвиток АВ призводить до того, що все більше речей та процесів матеріального світу будуть з'являтися шляхом «виробництво як послуга».

Список літератури

- 1 Carlota V. The role of AM in the automotive industry. 08.09.2021. URL: <https://www.3dnatives.com/en/the-role-of-am-in-the-automotive-industry/>.
- 2 Дорошенко В.С. Розвиток ринку 3d-технологій в заготівельному виробництві. *Процеси лиття*. 2021. № 2. С. 61–69.
- 3 Корнвейц А. 3D-печать и будущее мелкосерийного производства. 02.09. 2021. URL: <https://www.if24.ru/3d-pechat-i-budushhee-melkoserijnogo-proizvodstva/>.
- 4 Дорошенко В.С. Комплектация роботами конвейерных и роторно-конвейерных линий литейного производства. *Литье Украины*. 2019. № 6. С. 11–14.
- 5 Kang J., Ma Q. The role and impact of 3D printing technologies in casting. *China Foundry*. 2017. Vol. 14. No. 3. P. 157–168.
- 6 Aghaei Meibodi M., Giesecke R., Dillenburger B. 3D Printing Sand Molds for Casting Bespoke Metal Connections-Digital Metal: Additive Manufacturing for Cast Metal Joints in Architecture. *Proceedings of the 24th CAADRIA Conference*. Vol. 1. Wellington, New Zealand, 15-18 April 2019, P. 133–142.

Надійшла 13.09.2021

References

- 1 Carlota, V. (08.09.2021). The role of AM in the automotive industry. URL: <https://www.3dnatives.com/en/the-role-of-am-in-the-automotive-industry/>. [in English]
- 2 Doroshenko, V. S. (2021). Development of the market of 3D technologies in procurement production. *Casting processes*, no 2, pp. 61–69. [in Ukrainian]
- 3 Kornveits, A. (02.09.2021). 3D printing and the future of small batch production. URL: <https://www.if24.ru/3d-pechat-i-budushhee-melkoserijnogo-proizvodstva/> [in Russian]
- 4 Doroshenko, V.S. (2019). Equipping with robots conveyor and rotary-conveyor lines for foundry. *Casting of Ukraine*, no 6, pp. 11–14. [in Russian]
- 5 Kang, J., Ma, Q. (2017). The role and impact of 3D printing technologies in casting. *China Foundry*, vol. 14 no. 3, pp. 157–168. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41230-017-6109-z> [in English]
- 6 Aghaei Meibodi, M., Giesecke, R., Dillenburger, B. (2019) 3D Printing Sand Molds for Casting Bespoke Metal Connections-Digital Metal: Additive Manufacturing for Cast Metal Joints in Architecture. *Proceedings of the 24th CAADRIA Conference*. Vol. 1. Wellington, New Zealand, 15-18 April 2019, pp. 133–142. [in English]

Received 13.09.2021

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

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

P. B. Kaliuzhnyi, PhD (Engin.), Senior Research Scientist;

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

S. V. Kolomiitsev, Postgraduate, e-mail: 0507032994@ukr.net;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1698-6594>

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

EXAMPLES OF 3D TECHNOLOGIES FOR THE PRODUCTION OF HARDWARE AND POLYMER PATTERNS

The article gives examples of 3D printing (additive manufacturing, AM) of metal products and production trusses that have the ability to print foundry patterns. 3D printing perfectly copes with small-scale production and will increasingly be used in casting processes for the manufacture of patterns, especially disposable for precision metal casting. Existing farms of AM enterprises will serve as examples for the organization of future centralized productions, where foundries can order polymer patterns or even sand molds, or examples of AM sites as units of foundries. Recently, the popularity of photopolymer 3D printers, which print with high performance on the technology of forming a pattern of liquid photopolymer. Foundry and metallurgical processes are of course present in the AB of metal products, which cannot do without surfacing or fusion of layers or particles of metal, and AB is increasingly present in information topics and research descriptions of industry foundry journals and websites. Together with AM metal products, 3D printing of pattern-forming equipment will increasingly simplify the logistics of deliveries, bringing metal or polymer parts closer to the place of assembly of final products, their repair, modernization or production of metal products by forming equipment, including foundry. Fast AM opens up prospects for expanding opportunities both in product geometry and reducing many times (compared to traditional, obsolete production) the duration of technological training and its costs. Additive technologies make the process of topological optimization of structures the most efficient, allowing to produce lightweight structures, which in some cases resemble forms of natural origin. In general, the development of AB leads to the fact that more and more things and processes of the material world will appear through "production as service".

Keywords: 3D printing, additive manufacturing, AM, foundry production, foundry patterns, design, production farms AB, lightweight structures.

До уваги авторів!

Статті, що надходять в редакцію, повинні мати анотації і ключові слова українською та англійською мовами. Об'єм статті - не більше 12 стор., малюнків – не більше 5.

Статті подаються як на папері, так і в електронному форматі. Для текстових матеріалів бажано використати формат doc. Для графічних матеріалів – jpeg. Графічні матеріали необхідно зберігати в окремих файлах. Фотографії, малюнки, графіки і креслення мають бути чорно-білими, чіткими і контрастними.