

ПЕРЕДУМОВИ ВПРОВАДЖЕННЯ 3D-ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ МЕТАЛОВИРОБІВ ТА ПРИКЛАДИ ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ

¹Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

²Вінницький національний технічний університет

Виконано короткий огляд сучасного обладнання для адитивного виробництва, 3D-технологій і провідних компаній у цій галузі. Таке виробництво для моделювання і оптимізації конструкцій виливків та випуску металопродукції відповідає концепції Індустрії 4.0, спрямованої на те, щоб швидко, зручно, варіативно, з мінімальним персоналом та прагненням виключення суб'єкта з технологічного циклу виробництва, близького до вимог споживача, отримувати конкурентоспроможну продукцію, у тому числі промислові та будівельні металовироби. 3D-технологія, що включає оптимізацію конструкцій цифровими методами, є ефективним засобом зниження вартості і ваги металопродукції, зменшуючи витрати металу. На сучасному перехідному етапі до масового адитивного виробництва є потреба поступового суміщення цифрових і традиційних технологій в процесі розвитку промисловості на інноваційній основі, що є дієвим механізмом подолання кризових явищ воєнного та повоєнного періодів. В цьому плані значні можливості має застосування 3D-технологій для отримання литих металопродукцій, зокрема виготовлених способом лиття за моделями, що газифікуються. Наведено три приклади застосування 3D-технологій для друку металопродукцій, в процесі виготовлення легковагих ажурних виливків, що включає друк ливарної піщаної форми, та при 3D-фрезеруванні з пінополістиролу разової ливарної моделі. Як один із ключових драйверів Індустрії 4.0, 3D-технології, на думку експертів, здатні стати в один ряд із традиційними, а в близькій перспективі – замінити принаймні половину наявного верстатного парку та заготівельного обладнання. Про те, що стримує активне використання підприємствами 3D-принтерів, йдеться чимало, але найпоширеніше обмеження – неготовність самих підприємств переосмислити, інженерно трансформувати своє виробництво, поставити на рейки цифрових технологій; безумовно, це складно, але потрібно для збереження їх конкурентоздатності.

Ключові слова: 3D-технології; адитивне виробництво; Індустрія 4.0; друк металопродукції; друк ливарної форми; 3D-фрезерування ливарної моделі; лиття за моделями, що газифікуються.

Вступ

Розвиток сучасних 3D-технологій (адитивного виробництва) в промисловості і будівництві відповідає концепції Індустрії 4.0 [1], спрямованої на те, щоб швидко, зручно, варіативно, з мінімальним персоналом та прагненням виключення суб'єкта з технологічного циклу виробництва, близького до вимог споживача, отримувати конкурентоспроможну продукцію, у тому числі промислові та будівельні металовироби [1-3]. Наразі складно уявити виробників, розробників систем, промислових інтеграторів без лінійки своїх продуктів, підходів та рішень у контексті нової технологічної революції. Як один із ключових драйверів Індустрії 4.0, 3D-технології, на думку експертів, здатні стати в один ряд із традиційними, а в близькій перспективі – замінити принаймні половину наявного верстатного парку та заготівельного обладнання. Про те, що стримує активне використання підприємствами 3D-принтерів, йдеться чимало, але найпоширеніше обмеження – неготовність самих підприємств переосмислити, інженерно трансформувати своє виробництво, поставити на рейки цифрових технологій; безумовно, це складно, але потрібно для збереження їх конкурентоздатності.

Результати огляду та опис прикладів застосування 3D-технологій

Створити ініціативні команди, здатні із системним інженерним підходом реалізувати складні проекти відповідно до інвестицій під силу лише небагатьом, навіть великим зарубіжним компаніям (серед них, наприклад, General Electric, Siemens, ряд автоконцернів) [3], а в Україні це зробити ще складніше. Науковці українських інститутів аналізують концепції цифрових, «розумних» або смарт-підприємств (smart enterprise) та віртуальних фабрик майбутнього для того, щоб моделювати, проектувати та наблизити появу в нашій країні таких майданчиків цифрового проектування та моделювання продукції нового покоління [2, 3], зокрема в галузі виробництва литих металопродукцій.

Чимало західних компаній всерйоз займаються промисловою реалізацією фабрик майбутнього в контексті адитивного виробництва. Перше, що освоює будь-яка компанія, що пропонує промислові адитивні системи або доступні 3D-принтери, – це саму технологію та лінійку окремих пристроїв (рис. 1) [3]. На сьогоднішній день комерційно успішних промислових технологій не так багато: SLA, FDM, SLS,

DMLS/SLM, EBM, LMD/DED/LENS, EBAM, PJP, DLP, Inkjet. Розвиток обладнання йде від створення автоматизованих або роботизованих установок до гнучких виробничих систем (ГПС) з набором конфігурацій та кіберфізичних систем, які цифрове зображення «перетворюють» на фізичний виріб.



Рисунок 1 - Види обладнання 3D-принтіngu.

Пильну увагу звернено до цифрового забезпечення адитивного виробництва. Оскільки проектування деталей спеціально під адитивне виробництво DfAM (Design for Additive Manufacturing) знаходиться на ранній стадії розвитку, то фахівцям 3D-принтіга доводиться практично вручну стикувати окремі етапи та процеси: розробку виробів, інженерний аналіз, оптимізацію конструкції, теплові розрахунки тощо. При цьому витрачається час і виникає ризик помилок. Стандарти існуючих PLM рішень зараз не готові керувати інформацією про адитивні вироби. Наблизити готовність виробництва до формату Індустрії 4.0 можна за синергії створення інформаційних та фізичних об'єктів, для чого розробники промислових систем співпрацюють із софтверними компаніями для реалізації повноцінної цифрової екосистеми майбутнього виробництва.

Відома компанія Stratasys вже кілька років тестує новий клас автоматизованих пристроїв, так званих демонстраторів Індустрії 4.0 – того, як провідний виробник адитивного обладнання бачить виробництво майбутнього. Демонстратор Infinite-Build 3D (H2000) розроблено компанією для виробництва великогабаритного оснащення та кінцевих виробів за FDM технологією (рис. 2) [4].



Рисунок 2 – Демонстратор Stratasys Infinite-Build (H2000) 3D Printing System.

Цей пристрій вирізняє високі точність, повторюваність, швидкість, можливість друку виробів практично без обмежень за габаритами, а також мультиматеріальне виробництво з гранульованих матеріалів з можливістю їх заміни «на льоту». Вже зараз такі установки використовуються у Boeing та Ford Motor Company. У перспективному концепті компанії Stratasys – демонстраторі Robotic Composite 3D (рис. 3) [5] використовується гібридний метод виготовлення деталей з композитних матеріалів, як один з найбільш перспективних напрямків розвитку технологій 3D-принтінга.

В осередках замкнутого циклу одночасно працюватимуть адитивні та традиційні - субтрактивні технології, а нормоконтроль виконуватиме спеціально запрограмований для цього робот. Таке обладнання ефективно використовують в авіаційній, автомобільній промисловості з виробництва більш легких за масою деталей, збільшення паливної ефективності транспортних засобів, соціальної галузі, медицині та енергетиці. Наближаючись до втілення концепції Індустрії 4.0, компанією Stratasys створена незалежна від оператора, «хмарна» платформа, що саморегулюється, здатна самостійно здійснювати планування завдань в залежності від поточного завантаження кожного осередку.

Крім Stratasys, автоматизованими рішеннями займаються і низка інших компаній, наприклад, ARBURG, 3D Systems, Coobx, Formlabs, переважно у напрямку термопластиків і акрилових смол [3],

що, наприклад, підходить для виготовлення постійних моделей для формування в ливарному виробництві.



Рисунок 3 – Демонстратор Stratasys Robotic Composite 3D.

Окремо відзначимо успіхи з автоматизації та роботизації виробництва компаній, які виготовляють обладнання для друку з порошкових металів. Тут активно проявляють себе компанії AddUp, Concept Laser, EOS, Renishaw, SLM Solutions, Additive Industries, RPM (Okuma + Fastems + RPM), BeAM та інші [3]. Одні з них працюють над модульними системами, здатними взаємодіяти між собою, починаючи від підготовки порошку і закінчуючи термічними операціями зі зняття напружень в металовиробах та автоматичного або напівавтоматичного видалення підтримок. Інші активно розвивають повністю закриті системи з необхідним обладнанням, що здатне швидко розгортатися в пропонованих для виробництва приміщеннях з мінімальними вимогами.

Michelin, провідний виробник покришок – ймовірно, єдина компанія, яка змогла за більш ніж десятирічний термін зібрати різноманітні технологічні рішення та організувати автоматизоване серійне виробництво з використанням адитивних технологій. У компанії з 2000 р. використовують технологію селективного лазерного спікання дрібнодисперсного (6-8 мкм) порошку для 3D-друку ламелів для металевих ливарних форм, які складно відтворити за традиційними технологіями (рис. 4) [3]. Це підняло якість ливарної оснастки та кінцевої продукції на недосяжний раніше рівень: за рахунок використання друкованих ламелей оснастки тонкостінні внутрішні канавки шин мають складний профіль, що позитивно позначається на їх споживчих властивостях.

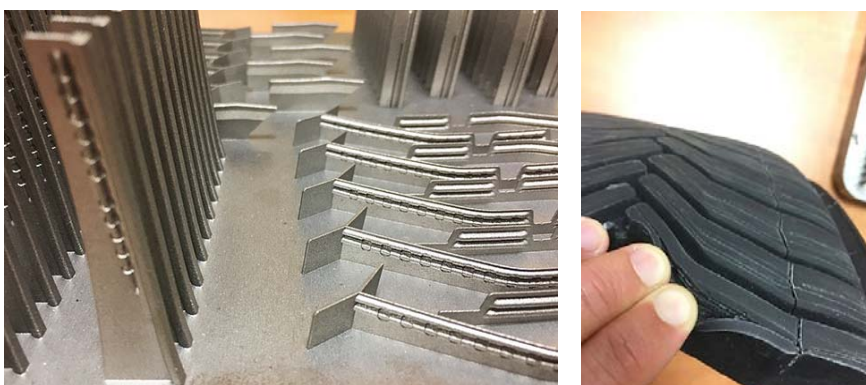


Рисунок 4 – Металеві ламелі ливарних форм та їх відбиток на готовій продукції.

Сумарно близько трьох десятків принтерів працюють у цілодобовому режимі, забезпечуючи ливарників високотехнологічних шин CrossClimate 1 млн. ламелей на рік. Укрупнено, такий автоматизований 3D-принтинг включає наступні технологічні процеси:

- підготовку, завантаження та вивантаження порошку в робочу зону 3D-принтерів;
- виробництво за допомогою технології селективного лазерного спікання на одно- або дво-лазерних системах;
- вивантаження із зони друку заготовок ламелей на платформи;
- ультразвукове миття заготовок ламелей;

- зняття ламелей із платформ;
- фінішну постобробку;
- контроль якості.

Кут друку без підтримуючих структур становить до 15 градусів, що цінять фахівці з 3D-принтіngu (рис. 5) [3]. Це стало можливим за рахунок використання дрібнодисперсних порошків.

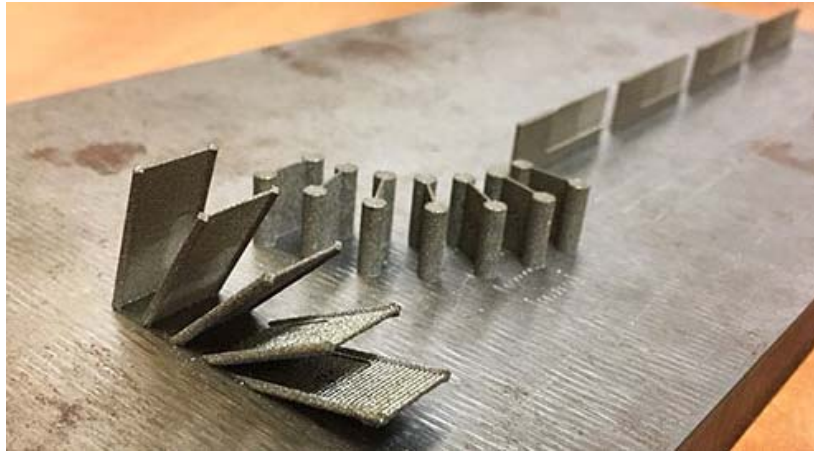


Рисунок 5 – Металопродукція з різними кутами 3D-принтіngu без підтримуючих структур.

Особливою складністю для розробників автоматизованої лінії було домогтися високої повторюваності результатів та надійності роботи обладнання, включаючи спеціально спроектовані механізми для взаємодії між «різношерстими» технологічними модулями, програмне забезпечення для підготовки, верифікації даних, а також систему управління замовленнями та контролю. Завдяки отриманому компанією Michelin досвіду роботи з адитивними технологіями спільне підприємство Fives Michelin Additive Solutions почало розробляти та постачати промислові технічні рішення для 3D-принтіngu під маркою AddUp. Інноваційна розробка AddUp – це мобільні виробничі системи FlexCare (рис. 6) [6], які забезпечують високий рівень охорони праці та навколишнього середовища. Система, що гнучко конфігурується на вимоги замовника, дозволяє організувати безпечне виробництво на основі дрібнодисперсних порошків практично в будь-якому виробничому приміщенні.



Рисунок 6 – Мобільні системи виробництва FlexCare.

Розробники та послідовники методології Індустрії 4.0 обирають передові рішення з орієнтацією на цифрові технології [7], а 3D-принтіngu відводять чільне місце як основному драйверу фізичного виготовлення продукції. Будь-яка технологія для виробництва залежить від притаманного їй обладнання, а цифрова технологія майбутнього – від обладнання майбутнього, яке передусім здатне до гнучкості та орієнтації на дрібносерійне виробництво великої номенклатури, або іншими словами – позамовному одиничному виробництву.

Хоча 3D-принтери досі лише небагатьма компаніями сприймаються як бізнес-інструмент, щоб трансформувати підходи до технології та якісно змінити кінцеву продукцію, все-таки промисловий переворот, при якому адитивне обладнання дійсно почне витісняти традиційне, станеться вже в недалекому майбутньому. У цей перехідний період, коли в керівників підприємств лише починає формуватися розуміння концепції Індустрія 4.0, а традиційні підходи, як і раніше, задовільно працюють, рекомендують гібридний підхід до освоєння цифрових технологій [3].

Серед таких прикладів – тонкостінна лита конструкція – «переможець» конкурсу Американської асоціації ливарників (AFS) та журналу Metal Casting Design & Purchasing як вилівок року – 2018 (рис. 7) [8, 9].



а



б



в

Рисунок 7 – Маятник (swingarm) при виді збоку (а), при виді вздовж руху мотоцикла (б) і в конструкції мотоцикла (в).

Це маятник (swingarm) підвіски заднього колеса спортивного електромотоцикла Lighting LS-218. Усього за три тижні компанія Tooling Equipment International (TEI) із США спроектувала, вилила, очистила, провела термо- та механообробки, а також рентгенівський контроль алюмінієвої деталі, яка схожа на сплетену з лози конструкцію чи «скульптуру павука», як її називають у публікації, а фото винесено на обкладинку журналу [8].

Спроектвавши за допомогою програмного забезпечення Autodesk, фахівці TEI методом 3D-друку виготовили піщану ливарну форму, в яку залили алюмінієвий сплав A365-T6, щоб створити прототип та довести можливості свого методу автоматизації проектування. Литва деталь (700×470×280 мм) замінює трисекційну заготовку зі зниженням маси маятника на 10 % до 6,4 кг. Піщана суміш, що використовували для 3D-друку, - це дешевий матеріал, який включає аналогічні складові матеріали, які ливарники застосовують протягом сотень років.

На цьому конкурсі також відзначено тонкостінний виливок (рис. 8 з журналу Modern Casting, 5-2018) з високоміцного чавуну 65-45-12 і товщиною стінок 6-7 мм. Він виготовлений литтям за моделями, що газифікуються (ЛГМ, англ. Lost Foam Casting), компанією ААМ Колумбіана (США). Виливок легший за прототип на 42 % [8], а його модель вирізано з блочного пінополістиродду на 3D-фрезері. Аналогічні моделі для ЛГМ-процесу, що виготовляються за 3D технологією, описано в роботі [2].

Такі високотехнологічні приклади відповідають інноваційній тенденції металозбереження, зазначеній серед пріоритетних напрямів удосконалення ливарного виробництва [7, 10]. У нинішній перехідний період поєднання цифрових та традиційних технологій оптимізація (за масою та міцністю) литих конструкцій представляється як синтез технологій формоутворення та відбору сплаву з бази даних високоміцних матеріалів, що дозволить адаптувати комп'ютерні методи проектування та прогнозування експлуатаційних властивостей металоконструкцій з галузей машинобудування та будівництва для автоматизованих систем проектування виливків малої металоємності. Крім того, зниження товщини стінки виливка, як правило, призводить до подрібнення кристалічної структури та зміцнення металу, що у свою чергу сприяє підвищенню його конструктивної міцності та зниженню ваги.



Рисунок 8 – Супорт (330×279×152 мм; 7,5 кг) важкої вантажівки Volvo-Mask, вилитий за ЛГМ-процесом.

Розвиток промисловості на інноваційній основі є дієвим механізмом подолання кризових явищ воєнного та повоєнного періодів. За допомогою інновацій, зокрема в тренді цифровізації, можна підвищити ефективність праці на промисловому підприємстві та знизити ресурсомісткість виробництва.

Висновки

Виконано короткий огляд сучасного обладнання для адитивного виробництва, 3D-технологій і провідних компаній у цій галузі. Таке виробництво з оптимізацією конструкцій металопродукції відповідає концепції Індустрії 4.0 і спрямоване на підвищення конкурентоспроможності у тому числі промислових та будівельних металовиробів. 3D-технологія є ефективним засобом зниження вартості і ваги металопродукцій, зменшуючи витрати металу. На сучасному перехідному етапі до масового адитивного виробництва проходить поступове суміщення цифрових і традиційних технологій в процесі розвитку промисловості на інноваційній основі, що послужить дієвим механізмом подолання кризових явищ воєнного та повоєнного періодів. В цьому плані значні можливості має застосування 3D-технологій для отримання литих металопродукцій, зокрема виготовлених способом лиття за моделями, що газифікуються. Наведено приклади друкованих металопродукцій, легковагих ажурних виливків, процес виготовлення яких включає 3D-друк ливарної піщаної форми, або 3D-фрезерування з пінополістиролу разової моделі. Як один із ключових драйверів Індустрії 4.0, 3D-технології, на думку експертів, здатні стати в один ряд із традиційними, а в близькій перспективі – замінити принаймні половину наявного верстатного парку та заготівельного обладнання. Найпоширеніше обмеження серед стримуючих факторів використання підприємствами 3D-принтерів – неготовність самих підприємств переосмислити, інженерно трансформувати своє виробництво, поставити його на рейки цифрових технологій, але це необхідно для збереження їх конкурентоздатності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гнатуш В. А., Дорошенко В. С. Перспективи розвитку ринку лиття у контексті «Індустрія 4.0». *Лиття України*. 2017. № 6. С. 18-21.
2. Шинский О.Й., Дорошенко В.С., Янченко О.Б. Перспективи виготовлення литих легковагих металопродукцій для будівництва споруд модульного типу. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. Том 33 № 2 (2022). С. 90-98.
3. Дорошенко В. С. Удосконалення адитивних технологій для моделювання та виробництва виливків із металів. *Лиття України*. 2018. № 6. С. 14-19.
4. Stratasys Showcases New H2000 Infinite Build 3D Printer to Prospects. August 3, 2017. URL: <https://3dprinting.com/news/stratasys-showcases-new-h2000-infinite-build-printer-potential-buyers/>.
5. The factory of the future is here. URL: <https://www.stratasys.com/en/demonstrators/> Gamme de machines de fabrication additive métal FormUP & cellules de travail Flex Care System. URL: <http://www.axena.fr/portfolio-items/addup-axena-design-equipements-industriels/>.
6. Гнатуш В. А., Дорошенко В. С. Напрями вдосконалення ливарного виробництва у контексті «Індустрія 4.0». *Промисловість у фокусі*. 2017. № 12. С. 38-42.
7. Shannon Wetzel. TEI swing arm wins casting of the year. *Modern Casting*. 2018. No. 5. P. 28-31.
8. La pièce de l'année 2018 pour l'AFS. 29.05.2018. URL: <http://www.fonderie-piwi.fr/post/2018/04/26/La-pi%C3%A8ce-de-l-ann%C3%A9e-2018-pour-l-AFS>.
9. Дорошенко В. С. Удосконалення адитивних технологій для моделювання та виробництва виливків із металів. *Лиття України*. 2018. № 6. С. 14-19.

REFERENCES

1. Hnatush V. A., Doroshenko V. S. Prospects for the development of the casting market in the context of "Industry 4.0". *Lyttya Ukrayiny*. 2017. No. 6. S. 18-21.
2. Shyns'kyi O.Y., Doroshenko V.S., Yanchenko O.B. Prospects for the production of cast lightweight metal structures for the construction of modular buildings. *Modern technologies, materials and structures in construction*. Volume 33, no. 2 (2022). S. 90-98.
3. Doroshenko V. S. Improvement of additive technologies for modeling and production of metal castings. *Lyttya Ukrayiny*. 2018. No. 6. S. 14-19.
4. Stratasys Showcases New H2000 Infinite Build 3D Printer to Prospects. August 3, 2017. URL: <https://3dprinting.com/news/stratasys-showcases-new-h2000-infinite-build-printer-potential-buyers/>.
5. The factory of the future is here. URL: <https://www.stratasys.com/en/demonstrators/>.
6. Gamme de machines de fabrication additive métal FormUP & cellules de travail Flex Care System. URL: <http://www.axena.fr/portfolio-items/addup-axena-design-equipements-industriels/>.
7. Hnatush V. A., Doroshenko V. S. Directions for improving foundry production in the context of "Industry 4.0". *Industry in focus*. 2017. No. 12. S. 38-42.
8. Shannon Wetzel. TEI swing arm wins casting of the year. *Modern Casting*. 2018. No. 5. S. 28-31.
9. La pièce de l'année 2018 pour l'AFS. 29.05.2018. URL: <http://www.fonderie-piwi.fr/post/2018/04/26/La-pi%C3%A8ce-de-l-ann%C3%A9e-2018-pour-l-AFS>.
10. Doroshenko V. S. Improvement of additive technologies for modeling and production of metal castings. *Lyttya Ukrayiny*. 2018. No. 6. S. 14-19.

Дорошенко Володимир Степанович – д-р техн. наук, провідний науковий співробітник відділу фізико-хімії ливарних процесів, Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (м. Київ), e-mail: doro55v@gmail.com, orcid.org/0000-0002-0070-5663.

Янченко Олександр Борисович – кандидат техн. наук / Ph.D., доцент, кафедри галузевого машинобудування, Вінницький національний технічний університет, e-mail: 1961yab@gmail.com, orcid.org/0000-0002-3888-3772.

V. Doroshenko¹
O. Yanchenko²

PREREQUISITES FOR THE IMPLEMENTATION OF 3D TECHNOLOGY FOR THE MANUFACTURE OF METAL PRODUCTS AND EXAMPLES OF ITS APPLICATION

¹Physical and Technical Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv
²Vinnitsia National Technical University

A brief overview of modern additive manufacturing equipment, 3D technologies and leading companies in this field is provided. Such production for the modeling and optimization of casting structures and the production of metal products corresponds to the concept of Industry 4.0, aimed at obtaining competitive products quickly, conveniently, variably, with minimal personnel and the desire to exclude the subject from the technological cycle of production, close to the requirements of the consumer, including industrial and construction hardware. 3D technology, which includes the optimization of structures by digital methods, is an effective means of reducing the cost and weight of metal structures, reducing metal consumption. At the current transition stage to mass additive production, there is a need for a gradual combination of digital and traditional technologies in the process of industrial development on an innovative basis, which is an effective mechanism for overcoming the crisis phenomena of the war and post-war periods. In this regard, the use of 3D technology for obtaining cast metal structures, in particular those made by casting according to gasifying models, has significant opportunities. There are three examples of the application of 3D technology for printing metal structures, in the process of manufacturing lightweight openwork castings, which includes printing a foundry sand mold, and during 3D milling of a one-time foundry pattern from polystyrene foam. As one of the key drivers of Industry 4.0, 3D technologies, according to experts, are capable of standing on a par with traditional technologies, and in the near future, replacing at least half of the existing machine park and procurement equipment. There is a lot of talk about what is holding back the active use of 3D printers by enterprises, but the most common limitation is the unwillingness of the enterprises themselves to rethink, engineer their production, put it on the rails of digital technologies; certainly, it is difficult, but necessary to maintain their competitiveness.

Keywords: 3D technologies; additive manufacturing; Industry 4.0; metal construction printing; mold printing; 3D milling of a foundry pattern; Lost Foam casting.

Doroshenko Volodymyr – Dr. Sci. (Engin.), Leading Researcher, Department of Physical Chemistry of Foundry Processes, Physical and Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv), e-mail: doro55v@gmail.com, orcid.org/0000-0002-0070-5663.

Yanchenko Olexander – PhD (Engin.), Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Vinnitsia National Technical University, e-mail: 1961yab@gmail.com, orcid.org/0000-0002-3888-3772.