

УДК 621.74.04

**О. Й. Шинський**, д-р техн. наук, проф., зав. відділу;  
e-mail: aluprt@ukr.net

**В. С. Дорошенко**, д-р техн. наук, старш. наук. співроб.,;  
e-mail: doro55v@gmail.com; ORCID 0000-0002-0070-5663

**А. С. Лисий**, інженер 1 категорії

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

## ТРИ ЕТАПИ СТАНОВЛЕННЯ ТА ЗРОСТАННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

В статті відображено аналіз розвитку ливарних процесів з огляду конструкційної різноманітності литих заготовок, для виготовлення яких придатні ці процеси. При цьому виконано обґрунтування систематизації як серед давно існуючих ливарних процесів, так і досить недавніх, впроваджених у виробництво як знакові оригінальні технології. Раніше і зараз здебільшого при формовці в парних опоках лили і ллють те (1), що могли заформувати. З розвитком лиття за разовими моделями, зокрема, що газифікуються, додалась можливість лити те (2), що могли змоделювати. З появою адитивного виробництва – 3D-технологій – додалась можливість лити те (3), що могли надрукувати чи «виростити». Причому зараз надрукувати можуть як ливарну модель (разову чи багаторазову), так і форму, а також виливок. Таким чином, йдеться про три етапи становлення і наступного збільшення можливостей ливарного виробництва. Наведено кілька прикладів із відкритих джерел світової технічної інформації, зокрема, про застосування і переваги цифрових технологій для оптимізації литих конструкцій, для технологічної підготовки виробництва, а також про перспективний напрям подальших досліджень. Заплановано цикл досліджень для розробки методів лиття за друківаними моделями, що газифікуються. Такі порожнинні моделі складаються з гладких зовнішніх оболонок з внутрішніми розпірками, їх застосовувати для лиття металу доцільно за деякою аналогією з вакуумно-глівковою формовкою методом поєднання порожнини моделей з атмосферою, зробивши канали в моделі та продавживши їх трубчастими випорами, що практично неодмінно виконують при формовці за процесами першого етапу. Тоді газовиділення, навіть бурхливі чи пікові, від газифікації полімерної моделі виводяться на верхню поверхню форми, де гази можуть підпалюватись для знешкодження аналогічно способу, що нами патентується.

**Ключові слова:** ливарне виробництво, металоємність, конструкція виливка, 3D-технології, цифровізація, технологічна підготовка, формовка, лиття за моделями, що газифікуються, газовиділення.

Зниження металоємності, підвищення конструктивних розмітття і досконалості виливків та продуктивності їх випуску, в тому числі із застосуванням 3D-технології, є одним із напрямів автоматизації та цифровізації ливарного виробництва, як основної заготівельної бази машинобудування [1, 2]. В статті відображено аналіз розвитку ливарних процесів з огляду конструкційної різноманітності литих заготовок, для виготовлення яких придатні ці процеси, та які, в свою чергу, систематизовано в триетапному вимірі як серед давно існуючих процесів, так і досить недавніх, впроваджених у виробництво як знакові оригінальні технології. Наведено кілька прикладів із відкритих джерел світової технічної інформації, зокрема, про застосування і переваги цифрових технологій для оптимізації литих конструкцій, для технологічної підготовки (ТП) виробництва, а також про перспективний напрям подальших досліджень.

Раніше і зараз здебільшого при формовці в парних опоках лили і ллють те (1), що могли заформувати. З розвитком лиття за разовими моделями, зокрема, що газифікуються, додалась можливість лити те (2), що могли змоделювати. З появою

## Нові методи та прогресивні технології лиття

адитивного виробництва – 3D-технологій – додалась можливість лити те (З), що могли надрукувати чи «виростити». Причому зараз надрукувати можуть як ливарну модель (разу чи багаторазову), так і форму, а також виливок. Таким чином, йдеться про три етапи становлення і наступного збільшення можливостей ливарного виробництва.

З появою моделей, що газифікуються, з досить легкою (і 3D) обробкою для них пінополістиролу (ППС) і формовкою в сипкому піску з'явилась можливість лити каркасно-комірчасті виливки, що схожі на конструкції живої і неживої природи. Це приклад того, що кожний наступний етап збільшував розмаїття конструктивної номенклатури виливків, а також і можливостей (в тому числі, за рахунок розроблених нами способів [2]) впливу на структуру і властивості литого металу. Якщо на першому етапі головним чином лили те, що «лягало» в роз'єм півформ і дозволяло протяжку моделі, то на другому етапі стали лити ще те, яку разову модель змогли виготовити, склеїти і заформувати в об'ємі сипкого (вібро-плинного чи «псевдорідкого») формувального піску та підживити розплавом металу для задовільного ним формозаповнення.

А третій етап розширив можливості для першого і другого (та створив і створює свої), зокрема, можливість досить швидкого впровадження у виробництво нової номенклатури литва за рахунок 3D-друкування і форм, і моделей, і виливків, так би мовити, «з повітря» без паперової документації на модельно-формувальну оснастку, а саме: з цифрових файлів за комп'ютерними програмами. Комп'ютерні програми тепер стали здатні до оптимізації (згідно експлуатаційних чи заданих умов) литих конструкцій і неминуче «привели» до природоподібних конструкцій, бо природна еволюція вже відібрала конструкції, що найбільш ресурсоефективно підкорюють простір. Зокрема, біонічні конструкції, мовби долаючи гравітацію, ростуть знизу вгору («до сонця»), якраз в тому напрямку, в якому зручно їх адитивно (додаючи пошарово) друкувати на 3D-принтерах, наслідуючи природні.

В якості прикладу застосування програм, якими за допомогою комп'ютера проєктують легковагі конструкції, на рис. 1 показано, як компанія Sandia спроектувала для утримання вантажу конструкцію легкого кронштейна [3], що може витримувати кілька різновидів навантажень, залишаючись при цьому структурно стабільним при мінімізації вібрації, що йде від зовнішніх кріплень. А на рис. 2 – приклад аналогічного кронштейна «біонічної» конструкції, що був вилитий в піщаній формі, виготовлений 3D-друком на принтері Voxeljet [4].

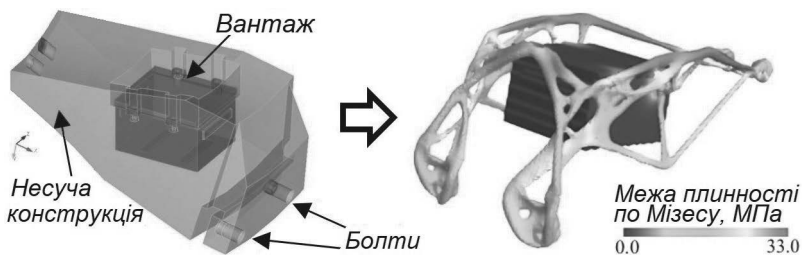


Рис. 1. Приклад проєктування легковагої конструкції кронштейна

Наступний приклад отримання суттєвих переваг від впровадження елементів третього етапу, як комплексу методів цифровізації ливарного виробництва, стосується стадії ТП виробництва [5], що нижче розглянемо докладніше. За традиційних технологій зазначених вище першого і другого етапів ТП виробництво з виготовленням оснастки, як правило, є вельми тривалим процесом, що недобре впливає на кінцеву ціну виробу та корегується за аналізом якості першої партії виливків, технологічності застосованих методів і операцій їх лиття. А відпрацювання нових методів формовки і нових литих конструкцій непростої геометрії тим більше підвищують терміни їх виготовлення, що негативно позначається на ефективності виробництва. Тому на етапі ТП передові підприємства впроваджують такі інформаційні технології, як [5]: системи автоматизованого проєктування технологічних процесів

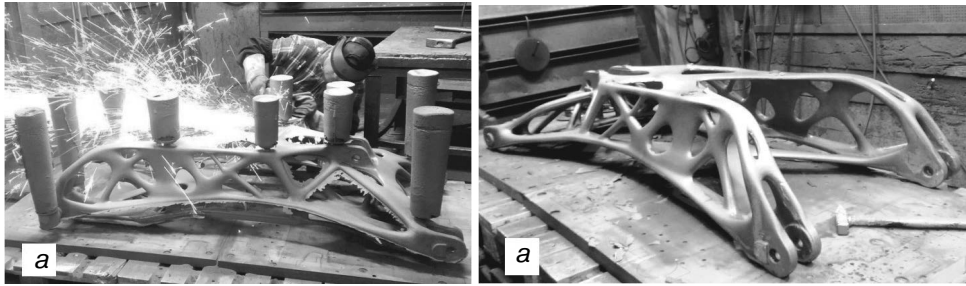


Рис. 2. Каркасний виливок: а – при обробці; б – після видалення заливів і надливів

лиття, системи комп'ютерного аналізу міцності і якості деталей, 3D-технології, комп'ютерні бази даних і довідкові системи тощо. Це скорочує терміни і трудомісткість ТП виробництва нової номенклатури виливків, їх металоємність, витрати на механічну обробку, дозволяє зменшити брак литва. Технології швидкого прототипування, зменшуючи терміни ТП, суттєво підвищують ефективність виробництва виливків з високою якістю поверхні і низьким браком; з їх застосуванням за моделями деталей з CAD-додатків створюють тривимірні фізичні моделі-прототипи чи піщані форми без інструментального їх виготовлення за такими напрямками [5].

1. Технологія Investment Casting – виготовлення моделей, що виплавляються чи випаляються. На 3D-принтері друкують модель вилівка, отриману з електронної тривимірної моделі деталі в системі комп'ютерного проектування; видрукувану модель покривають міцною вогнетривкою оболонкою, утворюючи форму для лиття, потім модель виплавляють чи (та) випаляють в печі при прожарюванні оболонкової форми. При цьому без виготовлення модельної оснастки для отримання разової моделі пристосовуються до діючого виробництва.

2. Технологія Direct Cast – друк на 3D-принтері ливарних піщаних форм, які заливають аналогічно типовим піщаним формам, що без потреби отримання традиційної оснастки скорочує термін виготовлення вилівка. Приклад виготовленого вилівка за цією технологією вище показано на рис. 2, а на стадії ТП виробництва технологію Direct Cast реалізують за схемою, що зображено на рис. 3 [5].



Рис. 3. Схема розробки ливарного процесу з 3D-друком ливарної форми

Підвищення ефективності ТП виробництва за рахунок впровадження цифрових технологій демонструє порівняння двох схем конструкторсько-технологічної підготовки виробництва (КТПВ) (рис. 4, 5) [5]. На рис. 4 – схема КТПВ без застосування цифрових технологій. Операції 2–15 виконуються фахівцями на підставі нормативних документів, особистого досвіду, розрахункових схем і типових технологій. При цьому операції доопрацювання оснастки і конструкторсько-технологічної документації 5–15 можуть повторюватись кілька разів з корегуванням оснастки, до завершення формування документації, яка забезпечує процес отримання придатних виливків.

КТПВ (схема на рис. 5) здійснюють з комп'ютерним моделюванням форми 3а, комп'ютерним аналізом затвердіння вилівка для визначення параметрів процесу лиття 4а і друком форм 10а чи моделей 11а. За рахунок комп'ютерного моделю-

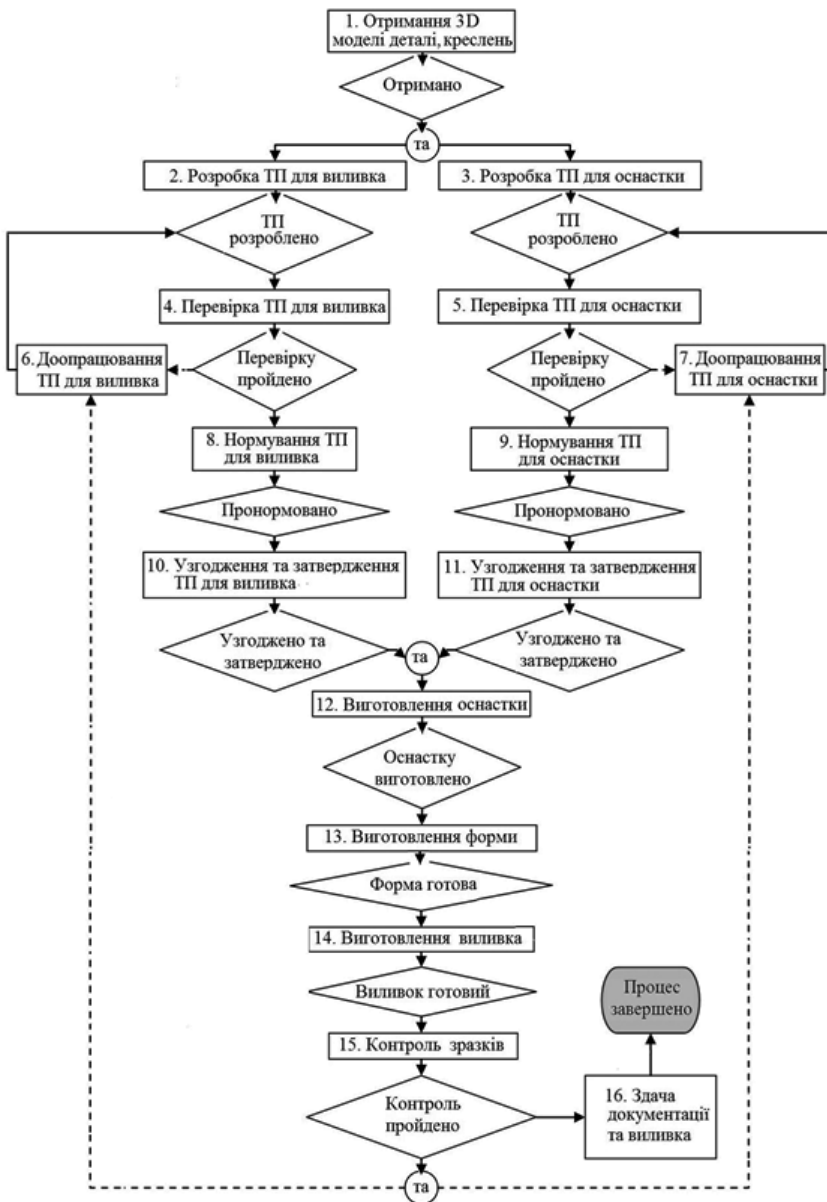


Рис. 4. Схема КТПВ без застосування нових цифрових технологій

вання форми виключаються операції 3, 5, 7, 9, 11, 12, 13 (рис. 4). Операції 2, 3а, 4а, 6, 8 (рис. 5) включають комп'ютерне моделювання процесу лиття, 10а – 3D-друк форми, 11а – друк разової моделі. Доопрацювання форми чи моделі здійснюється з внесенням змін до розробленого КТПВ на основі комп'ютерного моделювання та розрахунку процесів взаємодії в системі «виливок-форма». Комп'ютерне моделювання процесу лиття дозволяє скоротити кількість випробувань форми, ливникової системи, підібрати оптимальні параметри технологічного процесу, що знижує тривалість КТПВ нової номенклатури виливків.

Розглянутий приклад свідчить, що швидке прототипування не вимагає виготовлення оснастки і розробки технологічного процесу для неї, що скорочує тривалість виготовлення форми для лиття. При порівняльному аналізі ефективності двох схем КТПВ також враховують якість поверхні виливка, яка нерідко служить показником його технологічності та визначає ступінь його наближення до кінцевої деталі і впливає на вартість остаточної обробки.

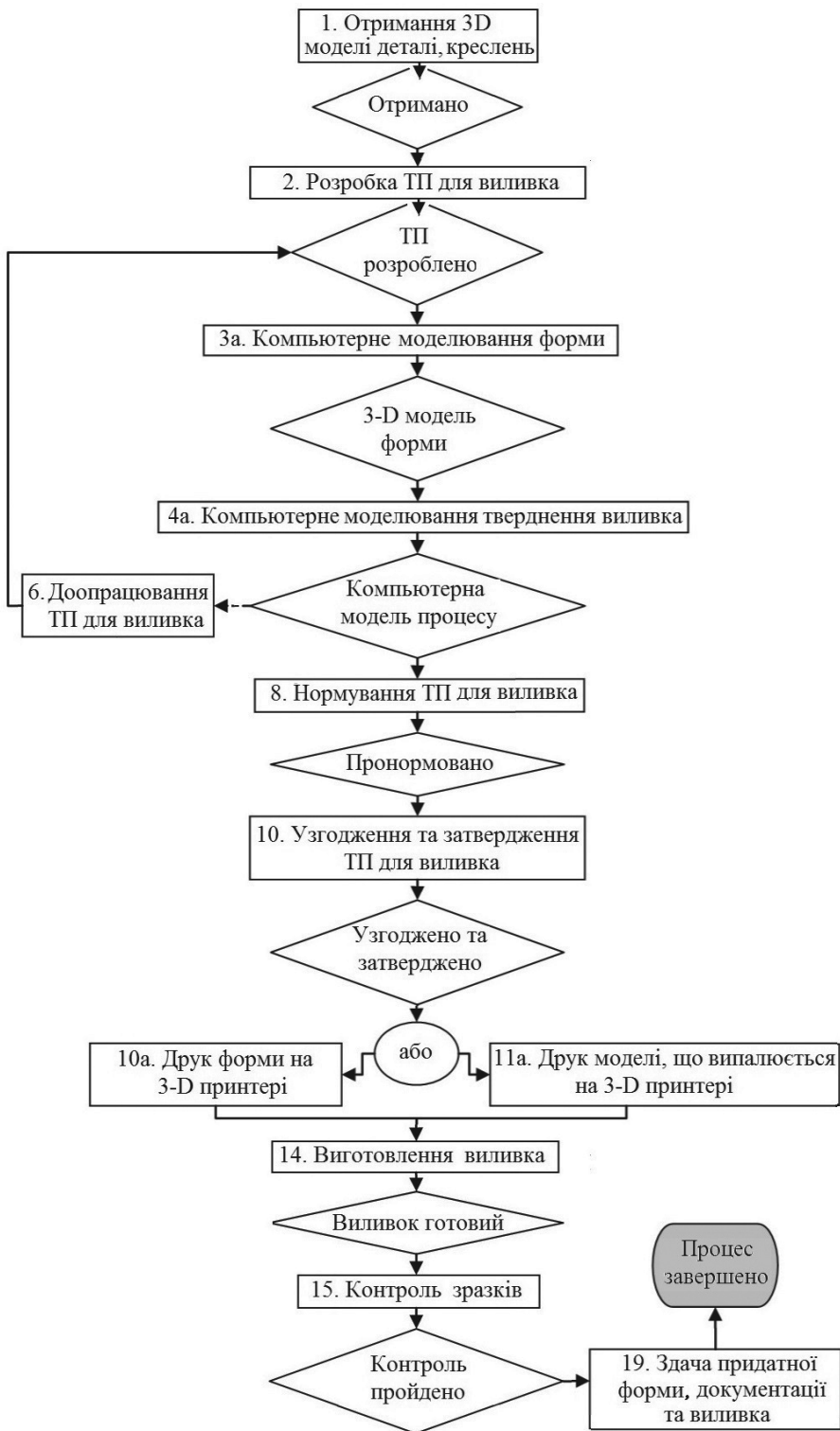


Рис. 5. Схема КТПВ із застосуванням 3D цифрових технологій

Ще одним прикладом застосування 3D-технологій при суміщенні другого і третього етапів розвитку технологій лиття служить 3D-друк полімерних моделей, зокрема, лопатей крильчатки. На рис. 6 зображено моделі, що виготовлені як ціль-

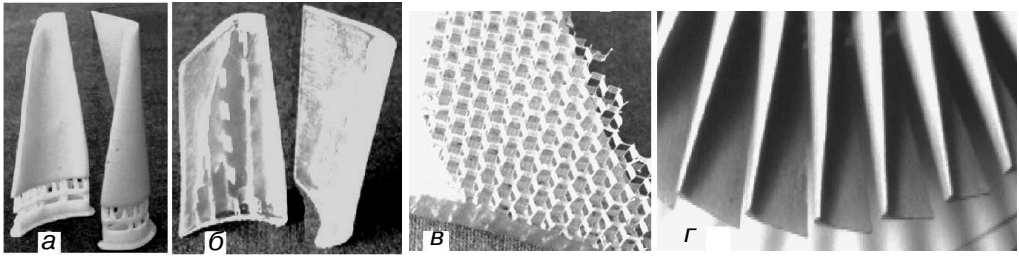


Рис. 6. Приклади друківаних полімерних моделей: а – модель лопаті цільна; б – модель лопаті з двох половин і порожниною після їх склейки; в – стільникова структура розпірок крильчатки; а також г – крильчатка з металевими лопатями, за такими моделями [6]

ними (а), так і з порожниною, яка утворюється при склейці моделі з двох половинок (б) [6]. Показано серцевину моделі (в) у вигляді комірчастих розпірок (каркасу чи комірчастої начинки) для утримання зовнішніх оболонок моделі, що важливо при наступній операції виготовленні форми без деформації порожнистої моделі. Також показано крильчатку з металевими лопатями, вилитими в оболонкові форми після випалювання з них друківаних моделей (г) за методом типу Replicast.

З останнього прикладу технологія лиття за моделями, що випалюються, подібна до технології лиття за моделями, що виплавляються, для яких характерна висока собівартість виливків. Значно нижча була б собівартість виливків за технологією лиття за друківаними моделями, що газифікуються (ЛГМ). Але маса друківаних моделей на одиницю об'єму вища від моделей з ППС (відповідно, і газотвірність), а також 3D-моделі залишають значно більше твердих залишків після прожарювання керамічних форм [6]. Хоча такі друківані моделі все частіше і більших розмірів застосовують у ливарній практиці [7], зокрема для виготовлення ободів колеса чи турбіни гідроагрегата (рис. 7).



Рис. 7. Приклади друківаних полімерних моделей у вигляді ободів

Відштовхуючись від розглянутих прикладів, у відділі фізико-хімії ливарного виробництва під керівництвом проф. О. Й. Шинського заплановано проведення циклу досліджень для розробки методів ЛГМ за друківаними моделями. Такі порожнинні моделі, що складаються з гладких зовнішніх оболонок з внутрішніми розпірками чи піно-подібним начинням, вирішено доопрацювати з огляду мінімізації витрат матеріалу високої газотвірності і такого, що дає багато твердого залишку при газифікації. При цьому застосовувати ЛГМ доцільно за деякою аналогією з вакуумно-плівковою формовкою, тобто методом поєднання порожнини моделей з атмосферою, зробивши канали в моделі та продовживши їх трубчастими випорами, що практично неодмінно виконують при формовці за процесами першого етапу. Тоді

газовиділення (у т. ч. бурхливі чи пікові) від газифікації полімерної моделі виводяться на верхню поверхню форми, де гази можуть підпалюватись для знешкодження аналогічно способу [8].

### Список літератури

1. Шинский О. И. Снижение металлоемкости литейной продукции – основа развития отрасли. *Оборудование и инструмент для профессионалов*. 2011. № 1. С. 78–79.
2. Дорошенко В. С., Калужный П. Б. Тонкостінний виливок з високоміцного сплаву як одне з головних завдань ливарного виробництва. *Процеси лиття*. 2020. № 3. С. 47–55.
3. Jan Vandenbrande. DARPA Trades Challenge Problems Overview. 6.03.2020. URL: <http://solidmodeling.org/trades-cp/>
4. Foundry corporate news. 24.11.2020. URL: <https://www.foundry-planet.com/d/amazone-tests-new-production-processes-with-the-design-freedom-of-3d-printing/>
5. Левкина О. Ю. Применение информационных технологий в организации конструкторского-технологической подготовки литейного производства авиастроительного предприятия. Известия высших учебн. заведений. Поволжский регион. *Технич. науки*. 2013. № 1. С. 115–122.
6. Митраков Г. Н. и др. Использование аддитивных технологий при литье по выжигаемым моделям. *Омский научный вестник*. 2015. № 2. С. 80–84.
7. Чехович А. Аддитивные технологии в литье по выжигаемым моделям. URL: <https://blog.iqb.ru/additive-technologies-cavityless-casting/>
8. Патент 147217 Україна, МПК8 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.

Надійшла 23.03.2021

### References

1. Shinskiy O. I. (2011). Reducing the metal consumption of foundry products - the basis for the development of the industry. *Oborudovanie i instrument dlya professionalov*. No. 1. P. 78–79. [in Russian]
2. Doroshenko V. S., Kalyuzhnyiy P. B. Thin-walled casting of high-strength alloy as one of the main tasks of foundry production. *Protsesi littyi*. 2020. No. 3. P. 47–55. [in Ukrainian]
3. Jan Vandenbrande. DARPA Trades Challenge Problems Overview. 6.03.2020. URL: <http://solidmodeling.org/trades-cp/> [in English]
4. Foundry corporate news. 11/24/2020. URL: <https://www.foundry-planet.com/d/amazone-tests-new-production-processes-with-the-design-freedom-of-3d-printing/> [in English]
5. Levkina O. Yu. (2013). Application of information technologies in the organization of design and technological preparation of the foundry of an aircraft building enterprise. *Izvestiya vyisshih uchebn. zavedeniy. Povolzhskiy region. Tehnich. nauki*. No. 1. P. 115–122. [in Russian]
6. Mitravkov G. N. et al. (2015). The use of additive technologies in casting for burned-out patterns. *Omskiy nauchnyiy vestnik*. No. 2. P. 80–84. [in Russian]
7. Chekhovich A. Additive technologies in casting for burned-out patterns. URL: <https://blog.iqb.ru/additive-technologies-cavityless-casting/> [in Russian]
8. Patent 147217 Ukraine, MPK 8 B22C 7/02, B22C 9/04. Method of metal casting according to gasified patterns with oxidation of gasification products / O. Y. Shinskiy, V. S. Doroshenko. Publ. 24.04.2021. Bull. № 16. [in Ukrainian]

Received 23.03.2021

**O. Y. Shinsky**, *Dr. Sci. (Engin) Senior Research Scientist*,  
e-mail: aluprt@ukr.net

**V. S. Doroshenko**, *Dr. Sci. (Engin) Senior Research Scientist*,  
e-mail: doro55v@gmail.com

**A. S. Lysyi**, *Engineer of the 1 category*

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

### **THREE STAGES OF FORMATION AND GROWTH OF OPPORTUNITIES FOR FOUNDRY PRODUCTION**

*The article presents an analysis of the development of foundry processes in view of the structural diversity of cast billets, for the manufacture of which these processes are suitable. At the same time the substantiation of systematization both among long-existing foundry processes, and rather recent, introduced in manufacture as sign original technologies is executed. Previously and now, mostly during molding in paired crucibles, they poured and poured what (1) they could form. With the development of casting on one-time pattern, in particular gasified ones, the possibility of casting what (2) they could model was added. With the advent of additive manufacturing – 3D technology, the ability to cast (3) that could print or “grow” was added. And now they can print both a foundry pattern (single or multiple) and mold, as well as castings. Thus, we are talking about three stages of formation and subsequent increase in the possibilities of foundry production. Several examples from open sources of world technical information are given, in particular, about the application and advantages of digital technologies for optimization of cast structures, for technological preparation of production, as well as about the perspective direction of further research. A series of studies is planned for the development of casting methods for gasified printed patterns. Such cavity fs consist of smooth outer shells with internal struts, they should be used for metal casting by some analogy with vacuum film molding by combining the cavity of the patterns with the atmosphere, making channels in the pattern and extending them with tubular protrusions. the first stage. Then the gas emissions, even rapid or peak, from the gasification of the polymer pattern are discharged to the upper surface of the mold, where the gases can be ignited for neutralization similar to the method that we patent.*

**Keywords:** *foundry production, metal consumption, casting construction, 3D technologies, digitalization, technological preparation, molding, Lost Foam casting, gasified patterns, gas evolution.*