

## МЕТОД ПОЄДНАННЯ ЛИВАРНОГО ТА ТЕРМІЧНОГО ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИЛИВКІВ ІЗ ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ

<sup>1</sup>Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України

<sup>2</sup>Вінницький національний технічний університет

За допомогою інновацій на промисловому підприємстві можна підвищити ефективність праці та знизити ресурсомісткість виробництва. Актуальність розвитку технології лиття металу у піщані форми, як найбільш поширеного ливарного процесу, обґрунтована тим, що в таких формах виробляють до 80 % тоннажу виливків, включно зі спеціальними видами лиття у форми з піщаних матеріалів. Потужності обладнання, площі, персонал ливарних цехів на 60–70 % відносять до процесів формовки, включно із сумішоприготуванням та виготовленням стрижнів. Забруднення «з вини форми» може сягати до 80 %. Значний потенціал для розвитку технології ливарної форми має удосконалення процесів лиття металу у форми з сипкого піску без зв'язувального компонента, зокрема за моделями, що газифікуються (ЛГМ). Авторами представлено концепцію удосконалення процесів лиття металу у форми з сипкого піску методом подвійного застосування формувальних матеріалів та наведено приклади такого застосування. Використання сипкого формувального піску для швидкого охолодження вилівка, включно з термообробкою, здатне зміцнювати його метал і скорочувати тривалість охолодження литва у формі, що збільшує продуктивності ливарних цехів без нарощування кількості опочної оснастки та сипкого наповнювача форми. Застосований спосіб ізотермічного гартування (аустемперінг) з гарячого стану виливків із залізовуглецевих сплавів включає нагрівання з витримкою для аустенізації виливків, чим зменшує собівартість, час та енергоємність отримання продукції зі зміцненою бейнітною структурою, що, по суті, відповідає концепції реалізації внутрішніх резервів як ливарної піщаної форми, так і литого металу. Деякі ливарні підприємства Вінниччини також застосовують ЛГМ чи уклали договори, плануючи реконструкцію своїх цехів під цю екологічну та економічно вигідну ливарну технологію.

**Ключові слова:** піщана форма; формувальний матеріал, сипкий пісок, ізотермічне гартування, внутрішні резерви, лиття за моделями, що газифікуються.

### Вступ

Розвиток підприємств на інноваційній основі є дієвим механізмом подолання кризових явищ воєнного та повоєнного періодів. За допомогою інновацій на промисловому підприємстві можна підвищити ефективність праці та знизити ресурсомісткість виробництва. Актуальність розвитку технології лиття металу у піщані форми, як найбільш використовуваного ливарного процесу випуску металевих заготовок, обґрунтована тим, що в таких формах у світі виробляють до 80 % тоннажу виливків, включно зі спеціальними видами лиття, що застосовують піщану форму. Потужності обладнання, площі і персонал типового ливарного цеху на 60–70 % належать до процесів формування, включно із сумішоприготуванням та виготовленням стрижнів. З огляду на збереження довкілля з відкритих джерел відомо, що забруднення «з вини ливарної форми» може сягати до 80 % всіх викидів ливарного цеху.

### Формулювання мети дослідження і розробки нової технології

За умов призупинення серійного випуску формувального обладнання в Україні актуальним напрямом розвитку технології ливарної форми є удосконалення процесів лиття металу у форми з сипкого (плинного) піску без зв'язувального компоненту, зокрема за моделями, що газифікуються (ЛГМ). Метою цієї публікації є обґрунтування на основі результатів останніх досліджень концепцій енергоощадного подвійного використання формувальних матеріалів при ЛГМ для підвищення ресурсоефективності (resource efficiency) ливарно-термічних процесів, зокрема тих, що полягають у новому методі суміщення ливарного і термічного процесів шляхом вилучення гарячих виливків із ливарної форми і подальше їх охолодження за режимом термічної обробки.

### Результати дослідження та опис ливарно-термічної технології

Значний вклад у розвиток технології ЛГМ та обладнання для неї внесено вченими і технологами Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України, що відображено на рисунках 1-6 з ливарних цехів та дільниць, на яких впроваджено технологію ЛГМ. У загальному випадку піщана формувальна суміш для ЛГМ складається зі свіжого, оборотного та терморегенованого сипких кварцових пісків. У контейнерній ливарній формі її зміцнюють вакуумуванням форми шляхом перепаду зовнішнього атмосферного тиску навколо форми і внутрішнього газового тиску в порах піску, пониженого шляхом підключення форми гнучким трубопроводом до вакуумного насосу.



Рис. 1. Приклади обладнання модельних дільниць цеху ЛГМ для виготовлення разових моделей з пінополістиролу (ППС) на автоклавах та станку з ЧПУ (3D-фрезері)



Рис. 2. Приклади формувальної оснастки – контейнерів та операцій формування за моделями з ППС



Рис. 3. Приклади заливання металом піщаних форм з вакуумуванням цих форм (тут бачимо відсутність газовиділення в робочу зону цеху)





Рис. 4. Видалення краном виливків із форми, обрізання на виливках ливників та очисні операції



Рис. 5. Обладнання ливарних конвєсєрів рольгангами та лінія регєнерації піску ззовні ливарного цеху



Рис. 6. Приклади ливарної продукції із залізовуглецевих сплавів цеху ЛГМ ФТІМС НАНУ

А модельно-формувальне обладнання та оснастка для ЛГМ (на відміну від громіздкого потужного обладнання для поширених традиційних формувальних процесів із піщаних сумішей зі зв'язувальними компонентами) доступне для виготовлення невеликим машинобудівним заводом і загалом не складніше від такого, що застосовують на багатьох заводах із виробництва будівельних матеріалів чи пакувальних підприємствах (рис. 1–6). При цьому ливарні моделі виготовляють з пінополістиролу (ППС).

Аналіз останніх досліджень та публікацій, а також досвіду застосування у ливарних цехах підтверджує такі переваги ЛГМ: віброущільнення сипкої суміші протягом 2–3 хв, відсутність складного обладнання для формовки та вибивки виливків, багаторазовий обіг формувального сипкого кварцового піску та висока точність виливків як для дрібно-, так і крупносерійного виробництва.

Відділ фізико-хімії ливарних процесів під керівництвом проф. О. Й. Шинського ФТІМС НАН України має значний досвід у розробці низки різновидів ЛГМ-процесу, резерви якого розкриті ще не до кінця. Деякі підприємства Вінниччини з ливарним виробництвом також застосовують ЛГМ або уклали договори (за сприяння авторів цієї статті), плануючи реконструкцію своїх цехів із впровадженням цієї досить нової технології для підвищення ресурсоефективності ливарного процесу.

Технологія ЛГМ дає змогу застосовувати виняткові способи охолодження металевих виливків, що кристалізується у піщаній формі після заливання металу. Якщо традиційно піщана ливарна форма служить для заливання в неї металу, кристалізації й охолодження затверділого виливка, то при ЛГМ сипкий пісок форми дозволяє зробити наступний крок – він може слугувати плинним піщаним середовищем для конвективного охолодження виливка [1]. Зокрема при регульованій швидкості висипання піску з форми його піщинки будуть ковзати по стінках виливка й охолоджувати його. За умов створення псевдозрідженого піщаного шару в контейнерній піщаній формі шляхом продування її повітрям ці піщинки будуть підстрибувати, битися об виливок і охолоджувати його ще з більшою інтенсивністю [2].

Якщо ми гарячий виливок із залізовуглецевого сплаву (з графітізованих чавунів, вуглецевих чи низьколегованих сталей) при температурі знаходження його металу в аустенітному стані видалимо з сипкого піску контейнерної форми, від якої попередньо відключили вакуумування, і в порожньому контейнері проведемо одну з таких операцій: 1) спреєрне гартування водою; 2) гартування методом короткочасного занурення в охолоджувальну рідину; або 3) для тонкостінних виливків виконаємо гартування витримкою на повітрі; а також ці варіанти охолодження приведемо до температури початку бейнітного перетворення, а потім знову засиплемо (заформуємо) виливок у контейнер сипким піском, нагрітим до температури в інтервалі бейнітного перетворення металу виливка; після ізотермічної витримки ми отримаємо виливок з бейнітною структурою металу [3].

У трьох перелічених варіантах швидкого (регульованого) охолодження (гартування) виливка з гарячого литого стану ми фактично ливарну операцію отримання виливка доповнили операцією термічної обробки, в якій нагрітий формувальний пісок став слугувати оточуючим середовищем для ізотермічної витримки виливка у бейнітному інтервалі температур. Такий режим термообробки називається Отже, на протигагу ливарному способу охолодження виливка в піщаній формі з отриманням за традиційних умов у структурі залізовуглецевого сплаву фериту чи перліту (в різному поєднанні) нами за рахунок суміщення ливарного процесу ЛГМ з ізотермічним гартуванням розроблено метод отримання бейнітної структури виливка. Така структура, яку отримують ізотермічним гартуванням в термічних цехах, наприклад, для високоміцного чавуну, здатна збільшити у 1,5–2,0 рази  $\sigma_b$ , та відносне видовження  $\delta$  (%) порівняно з литим станом [4, 5]. Таке взаємодоповнення процесів лиття та термообробки (їх застосування у тандемі) можна назвати ливарно-термічним процесом. А також швидке охолодження, як першу стадію ізотермічного гартування, можна провести у псевдозрідженому стані кварцового піску тієї ж ливарної форми, в якій затвердів виливок, бо такий шар «псевдокипіння» відомий у застосуванні серед методів термообробки як плинне гартувальне середовище, інтенсивність охолодження якого для металовиробу займає проміжне положення між водою та маслом [6].

Ливарно-термічний процес, зміст якого описано в попередньому абзаці, можна назвати ливарно-металургійним здобутком, в якому, просто змінивши режим охолодження уже затверділого гарячого виливка у ливарній формі на режим ізотермічного гартування, ми можемо реалізувати внутрішні резерви підвищення міцності і зносостійкості з «гарячого» литого стану сталей і графітізованих чавунів різних структурних класів шляхом їх внутрішнього резерву, зокрема і з отриманням в їх структурі метастабільного аустеніту, що зазнає динамічне деформаційне мартенситне перетворення (ефект самогартування при навантаженні, або тріп-ефект). Приклад реалізації такого ізотермічного гартування описано в роботі [7].

Для ізотермічно загартованого за описаним ливарно-термічним процесом високоміцного чавуну ми отримуємо бейнітний матеріал, що наближається до властивостей сталі, але має собівартість виробництва чавуну. Справа в тому, що цей матеріал у виливку за описаним процесом ми отримуємо не за кілька технологічних переділів, як сталь, а за один, подібно до типового виливання графітізованого чавуну. Це дасть значну економічну вигоду завдяки заощадженню ресурсів, скороченню тривалості виробництва ізотермічно загартованих виливків зі зменшенням навантаження на навколишнє середовище.

Контейнери для піщаних форм при ЛГМ традиційно виготовляють герметичними для вакуумування формами, що також дає змогу їх застосовувати для гартування із застосуванням рідини і сипкого піску безпосередньо на ливарних дільницях [1–3]. Тому за ливарно-термічним методом вони можуть отримати, крім призначення як ливарна оснастка, також друге застосування – для термообробки гарячих виливків із литого стану шляхом швидкого охолодження – гартування безпосередньо в цьому ж контейнері, або після видалення з форми виливків в аустенітному стані структури їх металу. Такий спосіб суміщення ЛГМ-процесу з термообробкою раніше не застосовували, у вітчизняних ґрунтовних

технічних публікаціях про технологію отримання бейнітних структур металовиробів з гарячого литого стану раніше не повідомлялося [4–6].

Також до реалізації «внутрішніх» ресурсних резервів вакуумованої піщаної форми при ЛГМ шляхом «перетворення» її піску з конструктивно-формуєтворюючого середовища для виливка до охолоджувального (при гартуванні) та нагрівального (при ізотермічній витримці) плинного матеріалу для виливка, крім подвійного використання такого формувального піску, можна додати ще один потенційно корисний технологічний здобуток. Він полягає в можливості подвійного застосування вакууму (газового розрідження) в порах піску ливарної форми при ЛГМ: по-перше, для зміцнення піщаної форми перепадом газового тиску (замість функції зв'язувального компонента в піщаній суміші для традиційної форми); та, по-друге, для інтенсивного охолодження затверділого гарячого виливка шляхом виконання операції наливання в пісок форми дозованої кількості води і засмокування її вглиб форми навколо виливка (як плинного холодоагента) відповідно до заданих умов охолодження виливка [8], зокрема і для ливарно-термічного процесу.

Реалізація такого потенційного резерву сухих формувальних пісків, як можливість бути в твердому стані при вакуумуванні та бути плинними (сипкими) при відключенні вакууму від ливарної форми, тобто подвійне застосування сухих кварцових пісків, зокрема в додатковій операції швидкого охолодження виливка, здатне (і за режимами термообробки у складі ливарно-термічного процесу також) зміцнювати його метал і скорочувати тривалість охолодження виливків у формі. Останнє збільшує продуктивність ливарних цехів без нарощування кількості ливарної оснастки і піщаного наповнювача форми [9]. А описані вище ливарно-термічні методи при гартуванні з литого стану (шляхом видалення із форми гарячого виливка червоного кольору практично невдовзі після його затвердіння) унеможливають традиційне тривале вистоювання форм в цеху для охолодження виливка, потім додаткове (притаманне типовим технологіям термообробки) нагрівання для аустенізації металу виливків у термічній печі і скорочують час та енергоємність отримання продукції з ізотермічно загартованою бейнітною структурою (омінаючи перлітне перетворення), що, по суті, відповідає енергоощадній концепції спільної реалізації внутрішніх резервів як піщаної форми, так і литого металу.

### Висновки

Використання сипкого формувального піску у розробленому ливарно-термічному процесі для швидкого охолодження виливка, включно з термообробкою, здатне зміцнювати його метал і скорочувати тривалість охолодження виливків у ливарній формі, що сприяє збільшенню продуктивності ливарних цехів без нарощування кількості опочної оснастки, сипкого наповнювача форми та площі під конвеєри чи ливарні плаці. Способи ізотермічного гартування (аустемперінг) залізобуглецевих виливків із гарячого литого стану виключають притаманне традиційній термообробці їх нагрівання з витримкою для аустенізації, чим скорочують час та енергоємність отримання продукції з бейнітною структурою. Зазначені процеси відповідають концепції реалізації внутрішніх резервів як ливарної піщаної форми, так і литого металу, а також сприяють екологічності та економічності ливарного виробництва.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Шинський О. Й., Дорошенко В. С. Спосіб виготовлення виливків у формах з сипкого піску: пат. 79715 Україна: МПК В22С 9/02. № u201213485; заявл. 26.11.2012; опубл. 25.04.2013, Бюл. № 8.
- [2] Калюжний П. Б., Дорошенко В. С. Спосіб охолодження виливків у ливарній формі чи контейнері з сипким наповнювачем: пат. 106005 Україна: МПК В22D 27/04. № u201510592; заявл. 30.10.2015; опубл. 11.04.2016, Бюл. № 7.
- [3] Дорошенко В. С., Шинський В. О. Спосіб виготовлення виливків з бейнітного або аусферитного чавуну з кулястим графітом: пат. 123731 Україна: МПК В22 D7/00, В22 D23/00, C21D5/02, C21D1/20, В22 D27/04. № u201708132; заявл. 04.08.2017, опубл. 12.03.2018, Бюл. № 5.
- [4] Савуляк В. І., Янченко О. Б. Економічні технології високоміцних графітизованих сплавів заліза: монографія. Вінниця: ВНТУ 2014. 160 с.
- [5] Найдек В. Л., Гаврилук В. П., Неижко И. Г. Бейнітний високопрочний чугун: монографія. Киев, 2008. 140 с.
- [6] Гуляев А. П. Металловедение: учебн. для вузов 6-е изд. Москва: Металлургия, 1986. 544 с.
- [7] Дорошенко В. С., Янченко О. Б., Лисий М. В. Литі модульні трали та перспективні методи виготовлення виливків для спеціальної техніки. *ВМТ*. 2022. № 2. С. 23–29.
- [8] Шинський О. Й., Дорошенко В. С. Ливарна форма для вакуумної формовки: пат. 83921 Україна: МПК В22С9/02, В22С27/04. № a200612198; заявл. 20.11.2006; опубл. 26.08.2008., Бюл. № 16.
- [9] Дорошенко В. С. Теоретичні і технологічні основи отримання піщаних форм із сухого дисперсного наповнювача для виробництва легковагих литих конструкцій: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 05.16.04. Київ, 2018. 37 с.



**Дорошенко Володимир Степанович** – д-р техн. наук, старший науковий співробітник відділу фізико-хімії ливарних процесів, e-mail: [dorosh@ptima.kiev.ua](mailto:dorosh@ptima.kiev.ua)

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ

**Янченко Олександр Борисович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри галузевого машинобудування, e-mail: [1961yab@gmail.com](mailto:1961yab@gmail.com)

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

**V. Doroshenko<sup>1</sup>**  
**A. Yanchenko<sup>2</sup>**

## **Combined method of foundry and thermal processes of manufacturing castings from iron-carbon alloys**

<sup>1</sup>Physico-technological institute of metals and alloys National academy of sciences of Ukraine

<sup>2</sup>Vinnitsia National Technical University

*With the help of innovations at an industrial enterprise, it is possible to increase labor efficiency and reduce the resource intensity of production. The relevance of the development of the technology of metal casting in sand molds, as the most common casting process, is justified by the fact that up to 80 % of the tonnage of castings is produced in such molds, including special types of casting in molds from sand materials. 60-70 % of the equipment capacities, areas, and personnel of foundry shops are attributed to molding processes, including mixing and rod production. Pollution "due to the mold" can reach up to 80%. A significant potential for the development of foundry mold technology is the improvement of the processes of casting metal into molds made of loose sand without a binding component, in particular, according to the Lost Foam Casting Process (LFC). The authors present the concept of improving the processes of casting metal into molds made of loose sand by the method of dual application of molding materials and give examples of such application. The use of loose molding sand for rapid cooling of the casting, including heat treatment, is able to strengthen its metal and reduce the duration of cooling of the casting in the mold, which leads to an increase in the productivity of foundries without increasing the number of furnace equipment and loose mold filler. The applied method of isothermal hardening (austempering) from the hot state of castings from iron-carbon alloys excludes heating with exposure for austenization of castings, which reduces the cost, time and energy consumption of obtaining products with a strengthened bainite structure, which, in fact, corresponds to the concept of realizing internal reserves as a foundry sand mold, and cast metal. Some foundry enterprises of the Vinnitsia region also use LFC or have concluded contracts, planning to reconstruct their shops for this ecological and economically beneficial foundry technology.*

**Key words:** sand mold; molding material, loose sand, isothermal hardening, internal reserves, Lost Foam Casting Process.

**Doroshenko Volodymyr** – Sc. Dr. (Eng.), Senior research officer, Department of Physics and Chemistry of Casting Processes, e-mail : [doro55v@gmail.com](mailto:doro55v@gmail.com)

**Yanchenko Alexander** – Ph .D. (Eng.), Associate Professor Associate Professor of the Department of Industrial Engineering, e-mail [1961yab@gmail.com](mailto:1961yab@gmail.com)