УДК 621.73.043:669.3:621.746.6
№ держреєстрації 0126U004726

Товариство з обмеженою відповідальністю
«ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
69008, м. Запоріжжя, вул. Південне шосе, 80

ЗАТВЕРДЖУЮ
проректор з науково-дослідної роботи
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
_____ Володимир КУХАР
«28» жовтня 2026 року

ЗВІТ

ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ «РОЗРОБЛЕННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ЩОДО ЗНИЖЕННЯ МАТЕРІАЛОМІСТКОСТІ ВИРОБНИЦТВА ФУРМ ДЛЯ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ В УМОВАХ РЕМОНТНО-МЕХАНІЧНОГО ПІДПРИЄМСТВА»

Етап: Дослідження, розроблення та обґрунтування технологічних рішень щодо зниження матеріаломісткості виробництва фурм для доменних печей

(остаточний)

Науковий керівник,
д.т.н., професор _____ Володимир ПАШИНСЬКИЙ
«20» жовтня 2026 року

2026

Рукопис закінчено «20» жовтня 2026 року

Результати роботи розглянуто Науково-технічною радою ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», протокол № 2 від «28» жовтня 2026 року

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР, д.т.н., професор **Володимир ПАШИНСЬКИЙ**		Керівництво НДР; аналіз вихідної технології та альтернативних технологічних схем; опрацювання варіантів одержання порожнистих заготовок, у тому числі відцентровим литтям; оцінка технологічної реалізованості рішень (вступ, розділи 1–3, висновки).
Відповідальний виконавець, д.т.н., професор **Володимир КУХАР**		Аналіз і обґрунтування варіантів формоутворення куванням і штампуванням; розроблення принципової технологічної схеми штампування та основ конструкції штампового оснащення; порівняльна оцінка технологічних варіантів (розділи 2–3, висновки).
Виконавець, здобувач вищої освіти **Наталія БУШУЙ**		Опрацювання варіантів одержання мідних заготовок литтям у піщано-глинисті та фуранові форми із застосуванням стрижнів; аналіз технологічних обмежень і матеріаломісткості варіантів (розділ 2).
Виконавець, здобувач вищої освіти **Анна БОРШОШ**		Опрацювання варіантів одержання порожнистих мідних заготовок відцентровим литтям; аналіз конструктивно-технологічних схем та вимог до обладнання й оснащення (розділ 2).

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 22 с., 5 табл., 1 рис., 9 джерел.

Ключові слова: доменна фурма, мідна заготовка, матеріаломісткість, лиття в кокіль, відцентрове лиття, піщаний стрижень, гаряче штампування, штампова оснастка, коефіцієнт використання металу.

Об’єкт дослідження – технологічний процес виготовлення мідних елементів фурм для доменних печей в умовах ремонтно-механічного виробництва.

Мета роботи – розроблення та обґрунтування технологічних рішень щодо зниження матеріаломісткості виробництва фурм для доменних печей шляхом аналізу та порівняльної оцінки способів одержання заготовок, їх гарячого штампування і механічної обробки з урахуванням можливості реалізації на наявному виробничому обладнанні.

Методи дослідження – аналіз чинної технологічної схеми та матеріального балансу; порівняльний технологічний аналіз варіантів лиття і формоутворення; розрахункова оцінка маси заготовок на послідовних операціях; аналіз конструктивних схем штампового оснащення та виробничих обмежень.

Результати та їх новизна. Систематизовано резерви зниження матеріаломісткості при виготовленні рилець доменних фурм. Показано, що найбільший резерв пов’язаний не з локальним коригуванням механічної обробки, а зі зміною форми вихідної заготовки та перенесенням формування центральної порожнини на ранні технологічні операції. Опрацьовано варіанти відцентрового лиття, лиття з неметалевим або металевим стрижнем, прошивання під час кування та штампування. Для технологічно прийнятного варіанта розроблено принципову схему гарячого штампування та конструктивні засади нового штампового оснащення.

Практичне значення полягає у формуванні технічної основи для дослідно-промислової перевірки технологічних рішень, спрямованих на скорочення маси металу, що переходить у прибуткову частину та стружку, і зменшення обсягу подальшої механічної обробки. Розрахункові показники варіантів мають попередній характер і потребують підтвердження під час виробничої апробації.

ABSTRACT

Research report: 22 pages, 5 tables, 1 figure, 9 references.

Keywords: blast-furnace tuyere, copper blank, material consumption, permanent-mould casting, centrifugal casting, sand core, hot die forging, forging die, metal utilization.

Object of research – the manufacturing process of copper components of blast-furnace tuyeres under repair and mechanical engineering production conditions.

Purpose – to develop and substantiate technological solutions for reducing material consumption in blast-furnace tuyere production by analysing and comparing blank production routes, hot die forging and machining, with due regard to their feasibility on the available production equipment.

Methods – analysis of the existing process route and material balance; comparative technological assessment of casting and forming options; calculation-based estimation of blank mass at successive operations; analysis of die-design concepts and production constraints.

Results and novelty. The main reserves for reducing material consumption in tuyere-nose production were systematized. The study showed that the principal reserve is associated with changing the initial blank geometry and forming the central cavity at an earlier process stage rather than with local optimization of machining. Centrifugal casting, casting with non-metallic or metallic cores, piercing during forging, and die-forging routes were considered. A conceptual hot-forging route and the basic design principles of new die tooling were developed for the technologically feasible option.

Practical significance – the results provide a technical basis for pilot-scale verification of solutions intended to reduce metal losses into the riser and chips and to decrease subsequent machining. The calculated indicators of the considered routes are preliminary and require confirmation under production trials.

ЗМІСТ

ВСТУП 7
1 АНАЛІЗ ЧИННОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РЕЗЕРВІВ ЗНИЖЕННЯ МАТЕРІАЛОМІСТКОСТІ 8
1.1 Вихідна технологічна схема 8
1.2 Обмеження локального вдосконалення чинної схеми 9
1.3 Критерії оцінювання технологічних варіантів 9
2 РОЗРОБЛЕННЯ ТА ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВАРІАНТІВ 11
2.1 Варіанти одержання порожнистої заготовки 11
2.2 Варіанти формоутворення куванням і штампуванням 13
2.3 Попередня матеріальна оцінка варіантів 13
3 ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ТА КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ 15
3.1 Вибір напряму для дослідно-промислового опрацювання 15
3.2 Принципова схема штампування та конструкція оснащення 16
3.3 Ризики, контрольні параметри та подальша перевірка 17
ВИСНОВКИ 19
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ 21

ВСТУП

Фурми доменних печей працюють в умовах інтенсивного теплового, механічного та хімічного навантаження. Для їх виготовлення застосовують мідь високої чистоти, оскільки теплопровідність матеріалу безпосередньо визначає ефективність відведення теплоти водоохолоджуваною конструкцією. Тому зниження матеріаломісткості має забезпечуватися без погіршення якості металу, щільності заготовки та надійності готового виробу [1–5].

Чинна схема виготовлення рильця фурми включає кокільне лиття суцільної мідної заготовки, видалення прибуткової частини, попередню механічну обробку, гаряче штампування та чистову механічну обробку. За виробничими даними маса відливки становить близько 196,5 кг, після видалення прибуткової частини – близько 135 кг, а готового елемента – близько 47 кг. Значна частина металу повертається у цикл як зворот або переводиться у стружку.

Метою НДР є розроблення та обґрунтування технологічних рішень щодо зниження матеріаломісткості виробництва фурм для доменних печей в умовах ремонтно-механічного підприємства. Для цього проаналізовано чинний матеріальний баланс, сформовано альтернативні схеми одержання порожнистих заготовок, оцінено можливість їх реалізації на наявному обладнанні та опрацьовано принципову схему гарячого штампування і конструктивні засади штампового оснащення.

1 АНАЛІЗ ЧИННОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РЕЗЕРВІВ ЗНИЖЕННЯ МАТЕРІАЛОМІСТКОСТІ

1.1 Вихідна технологічна схема

Рильце фурми виготовляється з міді М3р. Плавлення здійснюється у спеціалізованій індукційній тигельній печі місткістю близько 1 т. Основу шихти становить катодна мідь із додаванням контрольованої кількості власного звороту. Використання чистої компактної шихти обумовлене вимогами до хімічної чистоти, теплопровідності та стабільності властивостей металу.

Лита заготовка одержується у металевій формі верхнім заливанням. Кокіль забезпечує відносно високу точність геометрії та інтенсивне охолодження, однак за чинної схеми необхідна прибуткова частина. Після її видалення заготовка піддається механічній підготовці, нагріванню і гарячому штампуванню на молоті. Центральний отвір та остаточний зовнішній контур формуються переважно механічною обробкою. Матеріальний баланс див. табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Орієнтовний матеріальний баланс чинної технологічної схеми

Технологічний стан	**Маса, кг**	**Характер втрати / переходу металу**
Відливка з прибутковою частиною	196,5	Вихідна маса металу
Після видалення прибуткової частини	135	Прибуткова частина повертається у металургійний цикл
Заготовка під штампування	≈108	Метал видаляється при попередній механічній обробці
Після формування центрального отвору	≈78	Значна частина металу переходить у стружку/відходи
Готовий виріб	≈47	Корисна маса виробу

1.2 Обмеження локального вдосконалення чинної схеми

Аналіз показав, що окреме скорочення висоти прибуткової частини має обмежений потенціал, оскільки її наявність пов’язана з умовами живлення виливка під час твердіння. Так само механічна обробка сама по собі не створює резерву матеріалу: її обсяг визначається геометрією заготовки після лиття і штампування.

Зменшення частки катодної міді за рахунок власного звороту можливе лише за умови контролю чистоти, хімічного складу, газонасичення та якості литої структури. Для доменної фурми це принципово, оскільки зниження теплопровідності або поява дефектів у мідному елементі може негативно вплинути на його теплостійкість і ресурс [1–5].

Таким чином, найбільш суттєвий резерв полягає у зміні геометрії вихідної заготовки: центральний об’єм металу, який у чинній схемі видаляється після лиття та штампування, доцільно не заливати або видаляти у вигляді компактного зворотного металу на ранній стадії процесу.

1.3 Критерії оцінювання технологічних варіантів

Для порівняння варіантів прийнято такі критерії (табл. 1.2): зменшення вихідної маси відливки; скорочення металу, що переходить у стружку; можливість використання наявного плавильного та ковальсько-пресового обладнання; складність і вартість додаткового оснащення; керованість геометрії порожнини; технологічні ризики лиття і штампування; можливість повернення відокремленого металу в шихту.

Таблиця 1.2 – Критерії порівняльної оцінки технологічних схем

Критерій	**Зміст оцінки**	**Бажаний напрям**	**Примітка**
Матеріаломісткість	Маса металу на початку маршруту	Зменшення	Без погіршення якості
Стружкоутворення	Обсяг металу, що видаляється різанням	Зменшення	Перевага компактному звороту
Реалізованість	Відповідність наявному обладнанню	Підвищення	Мінімум нових агрегатів
Оснащення	Складність кокілю, стрижнів, штампа	Раціоналізація	З урахуванням ремонту і ресурсу
Якість	Щільність, чистота, геометрична стабільність	Забезпечення	Потребує виробничої перевірки

Таким чином, подальше вдосконалення технології доцільно спрямувати насамперед на зменшення вихідної маси заготовки та обсягу металу, що переходить у стружку. При цьому вибір технологічного рішення має враховувати не лише потенціал зниження матеріаломісткості, а й можливість його реалізації на наявному виробничому обладнанні.

2 РОЗРОБЛЕННЯ ТА ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВАРІАНТІВ

2.1 Варіанти одержання порожнистої заготовки

Виходячи з матеріального балансу, основним напрямом прийнято одержання заготовки з попередньо сформованою центральною порожниною. Це дає змогу зменшити обсяг металу, який у традиційному маршруті після штампування видаляється при свердлінні або фрезеруванні.

Опрацьовано п’ять основних технологічних підходів: відцентрове лиття порожнистої заготовки; лиття у кокіль зі стрижнем із піщано-глинистої або холоднотверднучої суміші; лиття у кокіль із центральним металевим стрижнем; прошивання суцільної заготовки під час вільного кування; формування отвору в процесі гарячого штампування. Додатково розглянуто зміну конструкції кокілю для одночасного одержання двох і більше заготовок.

Відцентрове лиття є технологічно привабливим для одержання порожнистих тіл, оскільки внутрішня порожнина формується без стрижня, а неметалеві включення та менш щільні фази мають тенденцію концентруватися ближче до внутрішньої поверхні, яка може бути видалена механічною обробкою [6]. Для досліджуваного виробу обмеженням є необхідність спеціалізованої відцентрової машини, оснащення та відпрацювання режимів заливання.

Лиття зі стрижнем із піщано-глинистої або холоднотверднучої суміші технологічно дозволяє сформувати центральну порожнину вже у виливку. Фуранові no-bake системи забезпечують підвищену міцність і точність стрижнів, але потребують контролю газоутворення та ефективної аспірації [7, 8]. Для мідної заготовки додатково необхідно перевірити стійкість стрижня до теплового навантаження та якість внутрішньої поверхні.

Металевий центральний стрижень у кокілі спрощує видалення формувальних матеріалів і може бути конструктивно інтегрований у наявну технологію кокільного лиття. Ключовими питаннями є гарантоване вилучення стрижня після твердnення, вибір конусності, теплових зазорів та режиму охолодження.

Порівняння способів формування відобрадено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняння способів формування центральної порожнини

Варіант	**Принцип формування порожнини**	**Нове обладнання**	**Основна перевага**	**Основне обмеження**
Відцентрове лиття	Відцентровими силами	Відцентрова машина	Мінімізація стрижнів і прибутку	Потреба в новому обладнанні та режимах
Кокіль + піщаний/ ХТС стрижень	Неметалевим стрижнем	Стрижневе оснащення	Сумісність з литтям у форму	Газоутворення, видалення стрижня
Кокіль + металевий стрижень	Металевим осердям	Модифікований кокіль	Можливість адаптації чинної схеми	Вилучення стрижня, теплові зазори
Вільне кування з прошиванням	Прошивнем	Кувальний інструмент	Компактний зворотний метал	Додатковий нагрів/операція
Штампування з формуванням отвору	Стрижнем/пуансонним елементом	Новий штамп	Суміщення формоутворення	Підвищені навантаження і складність штампа

2.2 Варіанти формоутворення куванням і штампуванням

Для суцільної заготовки розглянуто прошивання центрального отвору вільним куванням. Перевагою є одержання центральної частини у вигляді компактного металевого відходу замість стружки. Недоліком є введення додаткової операції та, залежно від температурного режиму, потреба у повторному нагріванні перед остаточним штампуванням.

Більш інтегрованим є формування порожнини безпосередньо у штампі. Однак така схема змінює характер течії металу, збільшує навантаження на центральні елементи оснащення та висуває жорсткіші вимоги до центрування пуансона і матриці. Тому для переходу до такого маршруту потрібне окреме конструкторсько-технологічне опрацювання штампа.

Також проаналізовано можливість наближення зовнішньої форми поковки до готового рильця. Повне одержання чистових розмірів гарячим штампуванням для даної деталі недоцільне через допуски, усадку та складність асиметричних елементів. Раціональним є зменшення припусків і перенесення частини формоутворення зі верстатів з ЧПК у штампову операцію за умови збереження стабільності процесу [9].

2.3 Попередня матеріальна оцінка варіантів

Для зіставлення маршрутів використано розрахункові маси заготовок на основних технологічних переходах (табл. 2.2). Наведені значення є інженерними оцінками, а не гарантованими виробничими показниками. Вони використовуються для ранжування напрямів і мають бути уточнені після вибору конструкції оснащення та проведення дослідних плавок і штампувань.

Таблиця 2.2 – Орієнтовні маси заготовок для порівнюваних технологічних маршрутів

Варіант	**Відливка, кг**	**Після прибутку, кг**	**Під штампування, кг**	**Після формування порожнини, кг**	**Готовий виріб, кг**
Чинна суцільна схема	196,5	135	108	≈78	≈47
Дві суцільні заготовки в одному циклі	≈188,5*	135	108	≈78	≈47
Порожниста заготовка зі стрижнем	≈132*	≈95*	≈77*	≈55*	≈47
Відцентрова порожниста заготовка	≈95*	≈90*	≈77*	≈55*	≈47
Суцільна заготовка + прошивання	≈110*	≈105*	≈85*	—	≈47

* Попередні розрахункові значення, що потребують експериментальної перевірки.

Порівняння підтверджує доцільність подальшого опрацювання саме порожнистих заготовок. При цьому найменша розрахункова маса відливки сама по собі не є достатньою підставою для вибору: необхідно враховувати доступність обладнання, складність оснащення, якість литої структури та ризики подальшого штампування.

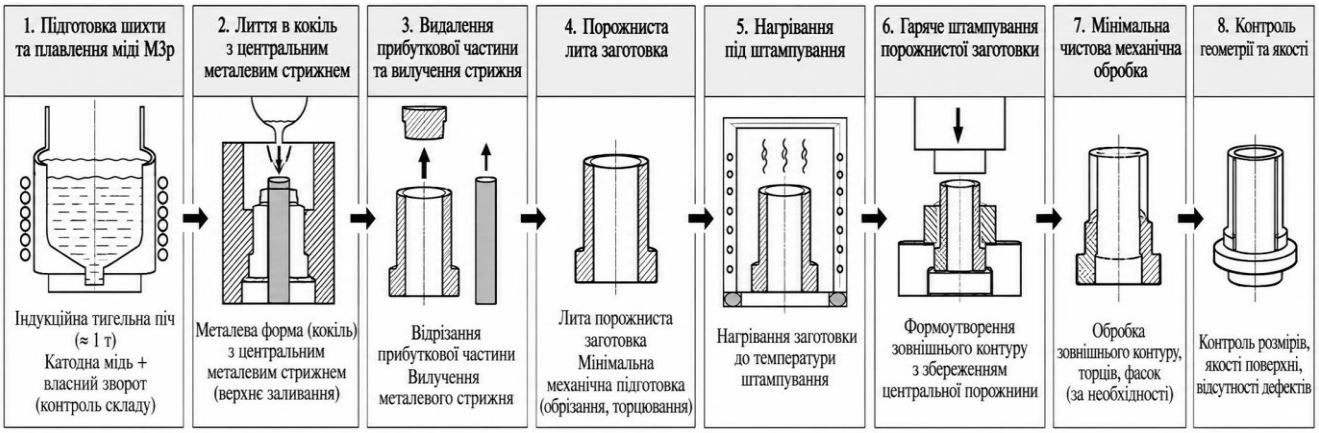
3 ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ТА КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ

3.1 Вибір напряму для дослідно-промислового опрацювання

Порівняльний аналіз показав, що в умовах наявного ремонтно-механічного виробництва найбільш реалістичним напрямом є адаптація кокільного лиття до одержання порожнистої заготовки з центральним металевим стрижнем та подальше гаряче штампування у спеціально розробленому штампі. Цей висновок стосується технологічної реалізованості на наявній виробничій базі і не означає, що інші способи мають гірший граничний потенціал матеріалозбереження.

Відцентрове лиття зберігається як перспективний альтернативний напрям, але його реалізація потребує спеціалізованої машини та окремого циклу відпрацювання технології. Варіант із піщаними або фурановими стрижнями може бути доцільним за наявності відповідної стрижневої дільниці та підтвердження прийнятної якості внутрішньої поверхні. Прошивання при куванні є технологічно можливим, але збільшує кількість переходів.

Запропонована послідовність для подальшої перевірки (рис. 3.1): підготовка шихти і плавлення міді → лиття порожнистої заготовки в модифікований кокіль → видалення прибуткової частини та мінімальна підготовка поверхонь → нагрівання → гаряче штампування з центруванням по центральній порожнині → обрізання/зачищення → чистова механічна обробка → контроль геометрії та якості.



Плавлення → кокільне лиття з центральним металевим стрижнем → порожниста заготовка → нагрівання → гаряче штампування → мінімальна чистова механічна обробка → контроль

Рисунок 3.1 – Принципова технологічна схема, рекомендована для дослідно-промислової перевірки

3.2 Принципова схема штампування та конструкція оснащення

Для реалізації штампування порожнистої заготовки опрацьовано конструктивну схему штампа з центральним центрувальним вузлом. До складу оснащення входять матриця, втулка матриці, пуансон і стрижень пуансона. Центральна пара забезпечує попереднє центрування заготовки та робочих частин до розвитку основного деформувального зусилля.

У креслярських матеріалах для штампа ГК-003 (табл. 3.1) передбачено контроль напрямних зазорів та обов’язкове застосування графітового або іншого високотемпературного мастила на робочих і напрямних поверхнях. Розрахункова маса складального штампа становить близько 558,6 кг. Робочі деталі передбачено виготовляти з інструментальної сталі 4ХВ2С із твердістю 45–50 HRC.

Важливою особливістю є те, що запропонована конструкція є основою для робочого проєктування, а не підтвердженим серійним рішенням. Ресурс центральних елементів штампа, фактичні навантаження, температурні

деформації та стійкість центрування повинні бути визначені під час дослідних штампувань.

Таблиця 3.1 – Основні елементи принципової конструкції штампового оснащення

Елемент	**Позначення**	**Функція**	**Ключова вимога**
Матриця	ГК-003.01	Формування зовнішнього контуру	Жорсткість, зносостійкість
Втулка матриці	ГК-003.02	Центрування центрального вузла	Стабільність посадки
Пуансон	ГК-003.03	Основне формоутворення поковки	Співвісність із матрицею
Стрижень пуансона	ГК-003.04	Центрування та робота з порожниною	Стійкість до згину і зношування

3.3 Ризики, контрольні параметри та подальша перевірка

Основні технічні ризики пов’язані з вилученням металевого стрижня з виливка, можливим утворенням дефектів внутрішньої поверхні, відхиленням співвісності порожнини, підвищеним навантаженням на центральний елемент штампа та невизначеним ресурсом нового оснащення. Окремо слід врахувати збільшення маси штампа і пов’язані з цим вимоги до безпечності монтажних та допоміжних операцій.

Під час дослідно-промислової перевірки доцільно контролювати хімічний склад і електропровідність/теплопровідність міді; макроструктуру та пористість литої заготовки; геометрію центральної порожнини після лиття і штампування; температуру нагрівання; характер заповнення порожнини штампа; зусилля та кількість ударів; знос і деформацію центрувальних елементів; фактичну масу металу на кожному переході.

Критерієм результативності подальшої апробації має бути не досягнення наперед заданого коефіцієнта використання металу, а статистично підтверджене зменшення витрат металу на одиницю придатного виробу за одночасного виконання вимог до геометрії, якості та експлуатаційної надійності фурми.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз чинної технології показав, що основні резерви зниження матеріаломісткості виробництва рилець доменних фурм пов’язані з етапами одержання та формоутворення заготовки. Локальне скорочення механічної обробки без зміни геометрії вихідної заготовки не усуває причину значного утворення стружки.

2. Сформовано та порівняно технологічні варіанти одержання порожнистої заготовки: відцентрове лиття; кокільне лиття з піщано-глинистим або холоднотверднучим стрижнем; кокільне лиття з центральним металевим стрижнем; прошивання при вільному куванні; формування порожнини під час гарячого штампування.

3. Встановлено, що для наявної виробничої бази найбільш реалістичним напрямом дослідно-промислового опрацювання є модифікація чинної схеми кокільного лиття шляхом формування центральної порожнини металевим стрижнем із подальшим гарячим штампуванням. Відцентрове лиття та стрижневі технології залишаються альтернативними напрямами за умови відповідного технічного оснащення.

4. Розроблено принципову технологічну схему штампування порожнистої заготовки та конструктивні засади штампового оснащення з центральним центруванням. Опрацьовано склад основних деталей штампа та вимоги до напрямних зазорів, мастила й контролю співвісності.

5. Розрахункове порівняння матеріальних потоків підтверджує потенціал зниження маси металу, що надходить у прибуткову частину та механічну обробку. Наведені числові значення для альтернативних маршрутів є попередніми і не розглядаються як гарантована або гранична ефективність технології.

6. Для підтвердження результативності необхідні дослідні плавки та штампування з контролем якості литої структури, геометрії порожнини, навантаження і стійкості штампа, фактичного матеріального балансу та властивостей міді. Остаточний вибір технологічної схеми має здійснюватися за результатами такої апробації.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Namballa B. R. M., Kishore K., Arora K. S., Mahobia G. S. Failure mechanisms of blast furnace tuyeres and mitigation strategies: A comprehensive review. Engineering Failure Analysis. 2025. Vol. 167. Art. 108968. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2024.108968.

2. Zhang J., Wang R., Hu R., Zhang C., Li G., Zhang Y., Wu W., Lu X. Failure mode and mechanism of a blast furnace tuyere. Engineering Failure Analysis. 2022. Vol. 137. Art. 106294. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106294.

3. Jiang L., Yang C., Yang B., Bai X., Du X., Hu Z., Lu T., Ma X., Yuan Y., Yan J., Li D. Research on the failure mechanism of blast furnace tuyere based on experiment and numerical simulation results. Engineering Failure Analysis. 2024. Vol. 164. Art. 108699. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2024.108699.

4. Gao T. L., Jiao K. X., Ma H. B., Zhang J. L. Analysis of tuyere failure categories in 5800 m³ blast furnace. Ironmaking & Steelmaking. 2021. Vol. 48, No. 5. P. 586–591. DOI: 10.1080/03019233.2020.1823199.

5. Gao T., Jiao K., Zhang J., Ma H. Melting Erosion Failure Mechanism of Tuyere in Blast Furnace. ISIJ International. 2021. Vol. 61, No. 1. P. 71–78. DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-138.

6. Добрянський С. С., Малафєєв Ю. М., Пуховський Є. С. Проектування та виготовлення заготовок. Київ : НТУУ «КПІ», 2014. 353 с. ISBN 978-966-7599-81-2.

7. Лютий Р. В., Селівьорстов В. Ю., Іванов В. Г., Ямшинський М. М. Зв’язувальні матеріали для ливарних форм і стрижнів: проблеми і перспективи. Метал та лиття України. 2022. Т. 30, № 2. С. 72–82.

8. Acharya S. G., Vadher J. A., Sheladiya M. A. A Furan No-Bake Binder System Analysis for Improved Casting Quality. International Journal of Metalcasting. 2016. Vol. 10, No. 4. P. 491–499. DOI: 10.1007/s40962-016-0059-x.

9. Melander A., Thuvander A., Ståhlberg U. Close-die forging of large Cu-lids by a method of low force requirement. Journal of Materials Processing Technology. 2006. Vol. 178, No. 1–3. P. 119–127. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.02.021.