

**О.М. Смірнов<sup>1</sup>**, доктор технічних наук, професор, завідувач відділу магнітної гідродинаміки, e-mail: stalevoz@i.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5247-3908>

**Л.В. Камкіна<sup>2</sup>**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теоретичних основ металургійних процесів, e-mail: lydmila\_kamkina@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-8329-0917>

**К.М. Шарандін<sup>3</sup>**, кандидат технічних наук, генеральний директор, e-mail: sharandin@gir.ua

**Д.М. Рябий<sup>3</sup>**, кандидат технічних наук, молодший науковий співробітник відділу магнітної гідродинаміки, e-mail: Ryaboii@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-8728-3175>

<sup>1</sup>Фізико-технологічний інститут металів та сплавів, НАН України (Київ, Україна)

<sup>2</sup>Український державний університет науки і технологій, Інститут промислових та бізнес технологій (Дніпро, Україна)

<sup>3</sup>ТОВ «ГІР-Інжиніринг» (Дніпро, Україна)

## Комплексна система відсікання конвертерного шлаку з використанням розроблених функціональних виробів ТОВ «ГІР-Інжиніринг»

*Серед найважливіших завдань, які потребують вирішення в умовах сучасного конвертерного цеху, є скорочення кількості кінцевого технологічного шлаку, що потрапляє до сталерозливного ковша при випуску плавки з агрегату.*

*За оцінками різних дослідників і практичного досвіду, кількість шлаку, яка потрапляє в ківш при випуску сталі з конвертора, розподіляється наступним чином (без використання технології / пристроїв відсікання шлаку): до 25% – на початку випуску плавки, до 60% – в кінці випуску плавки і до 15% – при поверненні конвертора до робочого положення.*

*Нині існують дві принципові схеми відсікання конвертерного шлаку: автоматична (активна) та «пасивна». До основних автоматичних схем відноситься газодинамічна система відсікання та система типу «шиберний затвор». Доступною й ефективною альтернативою є схема «пасивного» відсікання первинного та вторинного конвертерного шлаку з використанням функціональних вогнетривких виробів.*

*На промисловому майданчику компанії ТОВ «ГІР-Інжиніринг», спільно з ФТІМС НАН України, розроблено «пасивну» схему комплексного відсікання конвертерного шлаку. Вона містить дві системи: первинне відсікання пластичним стопором типу «тампон» і вторинне відсікання вогнетривким стопором типу «куля» / «дротик». Обидві системи працюють із ручними аплікаторами, що мінімізує капітальні витрати на їх упровадження у виробничий ланцюг. У період 2021–2024 рр. в умовах комбінату ПрАТ «КаметСталь» (конвертера ємністю 250 тн – 2 шт.) проведено успішні промислові випробування розробленої комплексної системи відсікання конвертерного шлаку.*

*Сумарний економічний ефект від впровадження становив  $\approx 1,2$  USD/т сталі.*

**Ключові слова:** конвертер, шлак, первинне відсікання, вторинне відсікання, стопор, аплікатор.

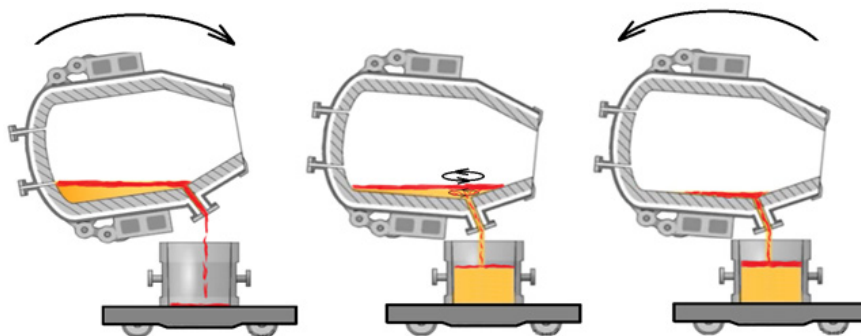
**Вступ.** Сучасна провідна тенденція в металургійній галузі – це зростаючий попит на так звані «чисті» сталі та розширення спеціального сортаменту продукції, що випускається. В таких умовах процеси виробництва на всіх технологічних переділах потребують подальшого дослідження й оптимізації [1; 2].

Серед важливих завдань, які вимагають вирішення в сучасному конвертерному цеху, слід виокремити скорочення кількості кінцевого технологічного шлаку, що потрапляє в ківш під час випуску рідкого ме-

талу з плавильного агрегату. В першу чергу, це виявлення та відсікання шлакового розплаву в ході переливу [3-5].

На основі практичного досвіду й оцінок багатьох дослідників, кількість шлаку, який потрапляє в ківш, під час випуску сталі з конвертора розподіляється наступним чином (без використання технології/пристроїв відсікання шлаку): до 25% – на початку випуску, до 60% – в кінці випуску і до 15% – під час повернення конвертора в робоче положення.

Схему випуску плавки й етапів потрапляння шлаку



**Рис. 1.** Схематичне зображення випуску плавки з конвертера та етапи потрапляння шлаку до сталерозливного ківша: а – початок випуску, б – кінець випуску (формування вихору), в – повертання («підйом») конвертера в робоче положення

через лютку до ківша наведено на рисунку 1.

Рисунку 1б ілюструє, як шлак часто виходить разом із металом, а також затягується при появі вихорового руху. При цьому, завжди існує небезпека, що частина металу залишиться в конвертері, що, до того ж, має наслідком зниження виходу придатного металу на плавку.

Нині існують декілька основних методів автоматичного визначення проникнення шлаку у струмінь металу: електромагнітний, вібраційний та інфрачервоний [6-11].

При використанні автоматичних систем раннього виявлення шлаку на зливні металу з конвертера відсікання шлаку, як правило, організовують за допомогою спеціальних пристроїв – «заглушок».

Прикладом такого пристрою може бути «газодинамічна» система відсікання шлаку [12], схематично наведена на рисунку 2.

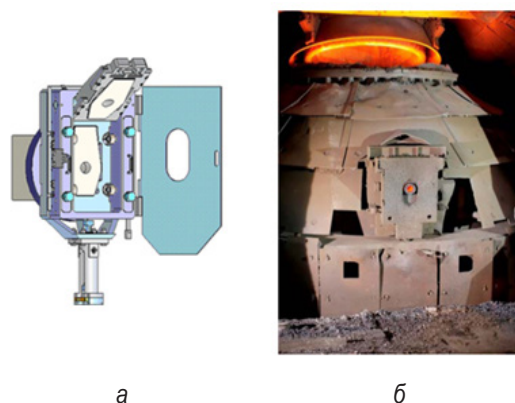
При виявленні шлаку у струмені металу за допомогою стопора (рис. 2, б3) у випускний отвір знизу під великим тиском подається інертний газ (рис. 2, б2), який очищує випускний канал і «розкидає» шлак по внутрішній поверхні конвертера. Недоліком такої системи є її висока вартість і вразливість сопла, через яке подається газ. Воно забивається шлаком і підлягає частому очищенню та заміні. Також ця система вимагає встановлення навісного обладнання/магістралей на кожусі конвертера та «мундштуку» люточного вузла.

Іншим прикладом пристрою для відсікання шлаку є система типу «шиберний затвор», яка перекриває

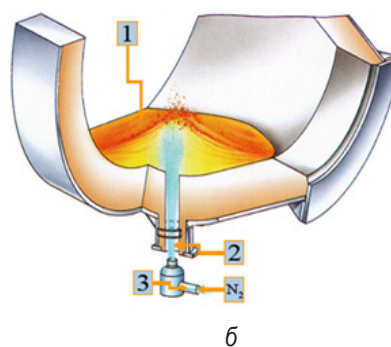
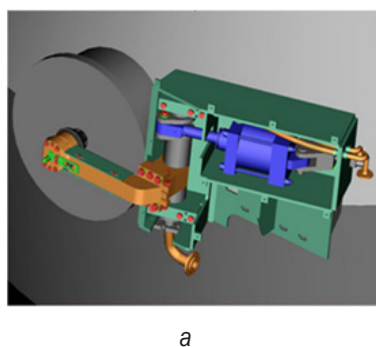
зливний отвір конвертера відповідно до команди оператора. У схематичному вигляді вона наведена на рисунку 3.

У цілому така система є доволі громіздкою та дорогою, а її успішне застосування визначається умовами роботи шибера. При цьому на механізм шибера впливає потужний тепловий потік, який може призвести до його передчасного руйнування.

В якості альтернативи для автоматичних методів/систем відсікання шлаку, які передбачають відповідне обладнання, широке застосування на практиці отримали так звані «пасивні» методи первинного та вторинного відсікання шлаку. Механізм їх дії заснований



**Рис. 3.** Система типу «шиберний затвор»: а – механізм шиберного затвору для відсікання шлаку, б – схема установки шиберного затвору на сталевипускному вузлу конвертера



**Рис. 2.** Механізм для газодинамічного відсікання шлаку: а – принципова схема його роботи; б – 1 – рідкий шлак; 2 – струмінь азоту; 3 – шлаковий стопор

на прояві певних фізичних ефектів і властивостей функціональних елементів, тобто шлаковідсічних стопорів [13–15]. Такі рішення в умовах українських підприємств у переважній більшості представлені зарубіжними постачальниками. Тому особливу актуальність набувають дослідження з розробки аналогів таких систем і функціональних виробів на основі вітчизняної сировини та промислових можливостей.

### Результати і обговорення

На початковому етапі такі дослідження у світовій науковій практиці прийнято проводити за допомогою методів фізичного моделювання. Вони дозволяють візуалізувати та кількісно оцінити більшість фізичних процесів, які супроводжують процес відсікання шлаку [16, 17].

Для оцінки гідродинаміки рідкої шлакометалевої ванни конвертера на етапі випуску плавки, а також вивчення процесів, які супроводжують первинне та вторинне відсікання кінцевого шлаку за допомогою функціональних елементів, було створено установку фізичної моделі конвертера в масштабі 1:6 по відношенню до типових геометричних розмірів 160 тн агрегату.

Перший етап моделювання полягав у дослідженні характеру руху потоків і формування рідкого вихору в процесі виливу плавки з конвертера.

Встановлено, що на 1-й секунді спостерігається випереджаюче потрапляння шлаку до каналу за рахунок його «набігання» перед металом – первинний кінцевий шлак. На 20–25-й секундах (наприкінці моделювання випуску) простежується чітка динаміка формування та розвитку вихору металу з затягуванням шлаку у часі.

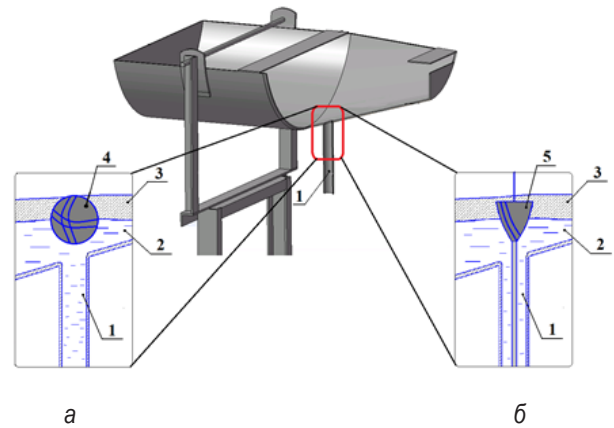
На другому етапі фізичного (холодного) моделювання для запобігання потраплянню першої порції шлаку (випереджаюче «набігання») до сталевипускного каналу встановлювали пластичну пробку у вигляді циліндричного стопору – «тампону».

Модель пластичного стопору виготовляли з суміші гончарної глини та крихти пінополістиролу. Такий матеріал при взаємодії з моделюючою речовиною (водою) руйнувався під дією феростатичного тиску стовпа рідини та забезпечував відкладений старт виливу плавки.

Встановлено, що використання пластичної пробки у вигляді циліндричного «тампону» забезпечую майже 98 % відсікання первинного шлаку, що «набігає» перед металом, при нахилі конвертера на першій хвилині випуску. У свою чергу, правильно підібрана шихтовка матеріалу забезпечує швидку руйнацію «тампону», який, виконавши свою функцію, не затримує технологічну операцію виливу.

На третьому етапі фізичного (холодного) моделювання досліджували методи вторинного відсікання шлаку наприкінці випуску плавки. У якості функціональних виробів «поплавкового» типу були обрані дві найбільш поширені та прості у використанні конструкції: стопор – «куля» та стопор – «дротик».

На рисунку 4 наведена схема третього модельного етапу вторинного відсікання кінцевого шлаку.



**Рис. 4.** Схематичне зображення третього модельного етапу вторинного відсікання кінцевого шлаку з використанням штучних функціональних виробів: а – стопор типу «куля», б – стопор типу «дротик»: 1 – сталевипускний канал, 2 – рідкий метал, 3 – рідкий шлак, 4 – «куля», 5 – «дротик»

Обидві моделі виготовлялись із пластиліну та пінополістиролу задля досягнення заданої щільності. Уявна щільність ретельно підбиралася як середнє значення між металом і шлаком (між водою та трансформаторним маслом). За таких умов стопор, який знаходиться на межі розділу фаз, передчасно не блокує льотку та вчасно виконує свою функцію відсікання.

Для гасіння вихору та затягування шлаку стопорам надавали спеціальну конфігурацію. Тіло стопора мало зміщений центр тяжіння, а на його поверхні було сформовано декілька борозн. Така конфігурація додатково забезпечувала стікання залишків рідкого металу по борознам стопору з конвертера в ківш у разі передчасного блокування льотки.

Встановлено, що правильно підібрані конструктивні та фізичні властивості стопору забезпечують не тільки відділення покривного кінцевого шлаку, але і мінімізують турбулентне, вихроподібне затягування шлаку в процесі виливу плавки в ківш.

За результатами фізичного моделювання, а також аналізу великого масиву промислових даних фізико-хімічного складу шлаків на «повалці» за умов ККЦ вітчизняних підприємств, розроблено два види стопорів вторинного відсікання шлаку типу «куля» та «дротик». Так для стопору вторинного відсікання шлаку типу «куля» присвоєно марку «GIR-Ballstop-KS», а для типу «дротик» – «GIR-Dart-AMKR». Особливості конфігурації виробів визначаються типорозміром та умовами зносу сталевипускного отвору конвертера. Хімічний склад вогнетривкового бетону (основний матеріал стопорів), їх питома щільність і вогнетривкість визначаються в залежності від технологічних умов конвертерної плавки для кожного підприємства окремо.

На наступному етапі для аналізу існуючих зразків (імпортного виробництва) та розробки вітчизняних аналогів функціональних пластичних виробів (стопорів первинного відсікання кінцевого конвертерного шлаку) використовували методи високотемпера-

турного фізичного моделювання.

Була розроблена оригінальна методика дослідження фізичних властивостей пластичного матеріалу стопору, яка включала 2 основні етапи, а в якості високотемпературного обладнання використовували піч Таммана.

Перший етап запропонованої методики полягає в аналізі еталонних зразків пластичних матеріалів стопорів європейських виробників (Німеччина). За результатами хімічного аналізу підбиралася близька шихтовка на основі доступної вітчизняної сировини.

На рисунку 5 представлений зовнішній вигляд лабораторних зразків пластичного матеріалу для стопорів типу «тампон». У таблиці 1 наведено основні фізико-хімічні показники матеріалів лабораторних зразків.



Рис. 5. Зовнішній вигляд зразків пластичних матеріалів що досліджувались, де зразки №1, №3 – імпортного виробництва («еталонні»); №2, №4-№6 – розроблені склади-аналоги

Еталонні зразки прожарювали за температури 1150 °С, потім робився хімічний аналіз матеріалу методом мокрої хімії. Одним з основних параметрів готового пластичного матеріалу для підбору шихтових компонентів на основі вітчизняної сировини був показник «в.п.п., %» (втрати маси при прожарюванні). Як показали подальші лабораторні дослідження, цей параметр відповідає водночас за герметизацію сталевипускного каналу до початку виливу та за механічну міцність «пробки» проти феростатичного

тиску стовпа металу. Також, від показника «в.п.п., %» пластичного матеріалу наряду залежить його уявна щільність і відкрита поруватість після спікання.

У промислову розробку в якості основного компоненту функціонального виробу було взято зразок пластичної маси під номером 5, та присвоєно марку «GIR-TAMP-DMK».

Компанією ТОВ «ГІР-Інжинірінг» разом із Фізико-технологічним інститутом металів і сплавів НАН України розроблено комплексну технологічну методику «пасивного» типу відсікання кінцевого конвертерного шлаку. Методика містить у собі систему первинного і вторинного відсікання.

На промисловому майданчику компанії ТОВ «Гір-Інжинірінг» (м. Дніпро) в період із вересня 2023 р. до жовтня 2023 р. вироблено дослідно-промислові партії стопорів первинного відсікання шлаку типу «тампон» марки «GIR-TAMP-DMK-150» в кількості 100 шт., і стопорів вторинного відсікання шлаку типу «куля» марки «GIR-Ballstop-KS» у кількості 100 шт. (50 шт. Ø 250 мм та 50 шт. Ø 220 мм). Партії зроблені на адресу ПрАТ «Камет-Сталь» для 250 тн конвертерів.

Система первинного відсікання кінцевого конвертерного шлаку з використанням пластичного стопора типу «тампон» марки «GIR-TAMP-DMK-150» та ручного механічного аплікатора/маніпулятора типу «штанга» марки «GIR-MAN-KS» представлена на рисунку 6.

Так, після шихтовки конвертера за допомогою ручного маніпулятора типу «штанга» (рис. 6. поз. 1) у сталевипускний канал льотки (рис. 6. поз. 2) встановлюють стопор (рис. 6. поз. 3). Стопор складається з несучої трубки з опорним нерухливим нижнім торцевим і притискним рухливим верхнім фланцями, між якими розміщена пластична вогнетривка «пробка» на основі алюмосилікатів, що містять легкоплавкі та тугоплавкі компоненти. Легкоплавкі та тугоплавкі компоненти в алюмосилікатах узяті в кількості, що забезпечує їх наступне співвідношення (0,15-

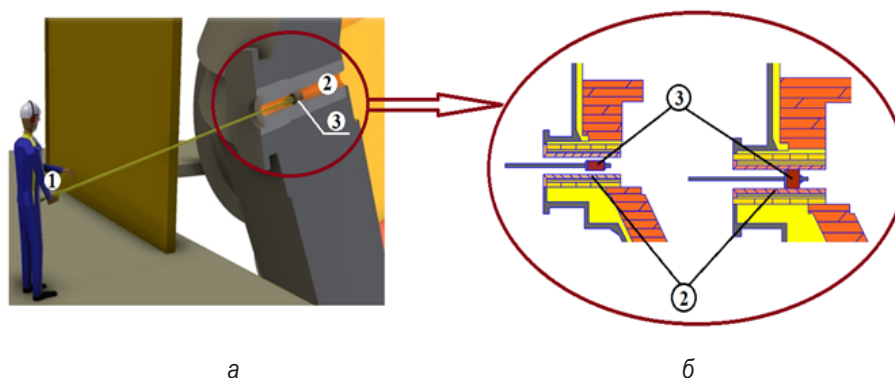
Таблиця 1

Задачі задування доменної печі, сформульовані на різних етапах розвитку доменної технології

№ зразка	Хімічний склад**, %					в.п.п., %	Вологість, W, %
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	C		
1*	31,3	2,3	3,52	54,4	7	16,8	26,3
2	32,7	3	2,7	55,2	5	12,6	25,5
3*	25,1	4,5	4,5	57,1	6	16,7	25,7
4	31,6	3,4	4,2	52,5	6	13,2	27,9
5	34,5	2,5	3,6	50,6	7,5	17,5	25,1
6	35,2	1,8	3,2	50,5	7	16,7	27,3

\* – «еталонні» зразки імпортного виробника (Німеччина).

\*\* – хімічний склад на прожарену речовину.



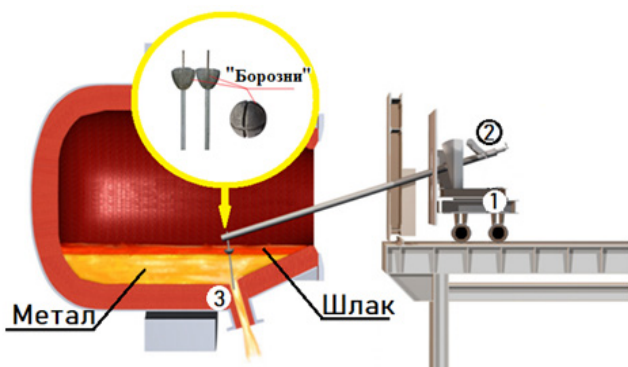
**Рис. 6.** Загальний вигляд а) та схематичний вигляд б) системи первинного відсікання кінцевого конвертерного шлаку, де 1 – механічний аплікатор (маніпулятор) із ручним приводом для встановлення пластичного стопора в льотку, 2 – сталерозливний канал (льотка), 3 – функціональний пластичний стопор типу «тампон»

0,24):(0,85-0,76), відповідно, при цьому легкоплавкі компоненти взяті фракцією 0-1 мм, а щонайменше 20 % від загальної кількості тугоплавких компонентів узяті фракцією 3,1-4 мм [18].

Далі пробку механічно розширюють у радіальному напрямку назовні до повного перекриття сталевипускного отвору в місці установаження стопора.

Для випуску плавки конвертер нахилиють убік зливу. До цього часу матеріал пробки вже спікається та щільно закупорює льотку. Спечена в льотці вогнетривка маса перешкоджає потраплянню до неї шлаку під час продувки розплаву в конвертері, особливо при збільшенні об'єму газорідної емульсії. При нахилі конвертера відбувається затримка випуску на 7-15 секунд. За цей час над сталевипускним отвором перебуває метал, а шлак спливає догори, не потрапляючи в льотку, при цьому спечена «пробка» починає проплавлятися та руйнується під феростатичним тиском стовпа металу і шлаку. Льотка звільняється та через неї зливається чистий метал у ківш.

Система вторинного відсікання кінцевого конвертерного шлаку з використанням вогнетривкого стопора типу «куля» марки «GIR-Ballstop-KS» та ручного, механічного аплікатора/маніпулятора типу «візок» марки «GIR-MAN-KS-2» представлена на рисунку 7.



**Рис. 7.** Загальний схематичний вигляд системи вторинного відсікання кінцевого конвертерного шлаку, де 1 – аплікатор (маніпулятор) типу «візок» для подачі стопору в порожнину конвертера, 2 – механічний привід від'єднання стопору від штанги, 3 – сталевипускний канал (льотка)

Так, під час випуску плавки з конвертера (після зливу 2/3–3/4 плавки) вогнетривкий стопор подається в порожнину агрегату до зони льотки (поз. 3) за допомогою спеціального маніпулятора типу «візок» (рис. 7, поз. 1) із ручним механічним приводом (рис. 7, поз. 2).

Вихрова воронка, що утворюється в процесі зливу металу, «захоплює» вогнетривкий стопор, за рахунок чого він самоцентрується по осі сталевипускного каналу. Для подальшого уповільнення (гасіння) вихору та мінімізації затягування шлаку стопор має спеціальну конструкцію. Він складається з верхньої і нижньої частини та є симетричним відносно вертикальній площини.

На зовнішній поверхні стопору утворена щонайменше одна борозна (канавка), тому центр ваги виробу зміщений. Центр ваги знаходиться на центральній осі у проміжку, який відповідає співвідношенню:

$$\frac{L_{\text{пр.}}}{H_{\text{с.тяж.}}} = 0,49 - 0,465, \quad (1)$$

де  $L_{\text{пр.}}$  – висота стопору (мм);  $H_{\text{с.тяж.}}$  – висота центру тяжіння по осі пристрою (мм).

Коли метал повністю зливається, стопор, що перебуває на межі розділу метал-шлак, перекриває сталевипускний канал, запобігаючи зливу шлакового розплаву у ківш.

Ефективність відсікання шлаку при цьому досягається за рахунок вибору раціональної щільності вогнетривкого матеріалу, котра як правило знаходиться в межах 3,7-4,1 кг/м<sup>3</sup>, що забезпечує розташування пристрою для утримання шлаку на межі розділу шлак-метал. При цьому питомі щільності складають співвідношення  $\rho_{\text{пр.}}/\rho_{\text{шл.}} \geq 1,01$ , де  $\rho_{\text{пр.}}$  – питома щільність матеріалу стопора (кг/м<sup>3</sup>);  $\rho_{\text{шл.}}$  – питома щільність кінцевого конвертерного шлаку (кг/м<sup>3</sup>).

Варіювання геометричних розмірів стопору в діапазоні 220–300 мм дозволяє врахувати в'язкість і товщину шару шлаку, характерні для конкретного виробництва, а також внутрішній діаметр сталевипускного каналу [19].

У період із грудня 2023 по лютий 2024 у конвертерному відділенні ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» пройшли

дослідно-промислові випробування комплексної системи первинного і вторинного відсікання кінцевого шлаку. Комплект поставленої системи включав у себе:

- пластичні стопори для первинного відсікання типу «тампон» марки «GIR-TAMP-DMK-150» в кількості 100 шт.;
- механічний ручний аплікатор/маніпулятор типу «штанга» марки «GIR-MAN-KS» у кількості 1 шт.;
- вогнетривкі стопори типу «куля» марок «GIR-BALLSTOP-KS-220» (діаметром 220 мм) у кількості 50 шт. та «GIR-BALLSTOP-KS-250» (діаметром 250 мм) у кількості 50 шт.;
- механічний ручний аплікатор/маніпулятор типу «візок» марки «GIR-MAN-KS-2» у кількості 1 шт.

Випробування проводилися згідно з затвердженим планом-графіком № ОК -67-23 ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ».

Оцінку ефективності системи відсікання шлаку здійснювали одразу за трьома параметрами: ступінь рефосфоризації сталі, витрати феросплавів на випу-

ску, кількість покривного шлаку перед АКП.

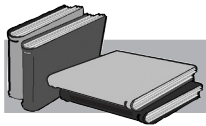
Так ступінь рефосфоризації у середньому складала 0,0085% з використанням системи відсікання проти 0,0115% без відсікання. Тобто на 26% менше.

Витрати феросплавів, таких як феросиліцій (FeSi65) і феросилікомарганець (FeSiMn) було знижено в середньому на 5,5%.

Кількість покривного шлаку (висота шлаку) в ковші при подачі на АКП була знижена на 30%. При цьому витрати плавикового шпату CaF<sub>2</sub> на плавку скорочено в середньому на 13%, що також позитивно впливає на стійкість футерівки стальковшу.

Сумарний очікуваний економічний ефект від упродовження комплексної системи первинного та вторинного відсікання шлаку складає ≈ 1,2 USD/тн сталі.

Комплексна система відсікання конвертерного шлаку виробництва ТОВ «ГІР-Інжиніринг» рекомендована до використання в умовах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» на постійній основі з внесенням змін до технологічної інструкції виробництва сталі в конвертерах підприємства.

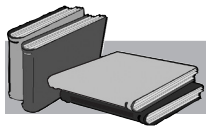


## ЛІТЕРАТУРА

1. P. C. Pistorius, Slag carry-over and the production of «clean» steel, J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 119 (2019), 557–561. <http://doi.org/10.17159/2411-9717/kn01/2019>
2. Steneholm K, Andersson NAI, Tilliander A, Jönsson PG. The role of process control on the steel cleanliness. *Ironmaking & Steelmaking*. 2018;45(2): 114-124. doi:10.1080/03019233.2016.1245917
3. А. Бергхефер, Б. Штайнер, Усовершенствованный выпуск высококачественной стали из LD-конвертера в компании Salzgitter Flachstahl // Черные металлы. - 2012.- №7.- с. 39-43.
4. A. Kamaraj, G. K. Mandal, S. P. Shanmugam, G. G. Roy, Quantification and analysis of slag carryover during liquid steel tapping from BOF vessel, *Can. Metall. Q.*, 61 (2022), 202–215. <https://doi.org/10.1080/00084433.2022.2044688>
5. M. Brämning, B. Björkman, C. Samuelsson, BOF process control and slopping prediction based on multivariate data analysis, *Steel Res. Int.*, 87 (2016), 301–310. <https://doi.org/10.1002/srin.201500040>
6. Z. Zhang, L. Bin, Y. Jiang, Slag detection system based on infrared temperature measurement, *Optik*, 125 (2014), 1412–1416. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.08.016>
7. P. Patra, A. Sarkar, A. Tiwari, Infrared-based slag monitoring and detection system based on computer vision for basic oxygen furnace, *Ironmak. Steelmak.*, 46 (2019), 692–697. <https://doi.org/10.1080/03019233.2018.1460909>
8. Z. Zhang, Q. Li, L. Yan, Slag detection system based on infrared thermography in steel making industry, *Recent Pat. Signal Process.*, 5 (2015), 16–23. <https://doi.org/10.2174/2210686305666150930230548>
9. R. Usamentiaga, J. Molleda, D. F. Garcia, J. C. Granda, J. L. Rendueles, Temperature measurement of molten pig iron with slag characterization and detection using infrared computer vision, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 61 (2012), 1149–1159. <https://doi.org/10.1109/TIM.2011.2178675>
10. B. Chakraborty, B. K. Sinha, Development of caster slag detection system through imaging technique, *Int. J. Instrum. Technol.*, 1 (2011), 84–91. <https://doi.org/10.1504/IJIT.2011.043599>
11. F. Wu, Y. Wang, A method for detecting the slag transferring from ladle to tundish based on video system, *Ind. Control Comput.*, 18 (2005) 38–47.
12. Eysn M. Pneumatic slag stopper for oxygen converters / M. Eysn // *Iron and Steel Engineer*. – 1983. – №10. – P. 53 – 55.
13. W. S. Howanski, T. Kalep, T. Swift, Optimizing BOF slag control through the application of refractory darts, *Iron Steel Technol.*, 3 (2006), 36–43.
14. Lee, S.J., Kim, S.J. & Lee, H.G. New idea of suppressing free surface vortex during tapping liquid steel from converter. *Met. Mater. Int.* 22, 136–142 (2016). <https://doi.org/10.1007/s12540-015-5428-0>
15. Пат. 2795226. Китай, МПК C21C5/46. Пробка конвертерного шлаку / Чжан Чуньхуэй, Ли Хуэйфэн, Чжу Цзяньчжун, хэ Цюань. - № 200520108497.5; заяв. 27.05.2005. опубл. 12.07.2006.
16. A. Kamaraj, G. K. Mandal, G. G. Roy, Control of slag carryover from the BOF vessel during tapping: BOF cold model studies, *Metall. Mater. Trans. B*, 50 (2019), 438–458. <https://doi.org/10.1007/s11663-018-1432-3>
17. K. Ashok, G.G. Roy, and G.K. Mandal: Modeling and Simulation Studies on BOF Tapping Process, 3rd International Conference of Ironmaking and Steelmaking, Kanpur, 2017, pp. 403–406.

18. Патент України на винахід. Номер заявки а202303647 від 28.07.23; Немсадзе Г.Г., Шарандін К.М., Смірнов О.М., Джоджуа Р.А., Рябий Д.В.
19. Патент України на корисну модель. Номер заявки а202303358 від 10.07.23; Немсадзе Г.Г., Шарандін К.М., Смірнов О.М., Джоджуа Р.А., Рябий Д.В.

Надійшла 26.09.2024



## REFERENCES

1. Pistorius, P. C. (2019). Slag carry-over and the production of clean steel. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 119(6). <https://doi.org/10.17159/2411-9717/kn01/2019>
2. Steneholm, K., Andersson, N. A. I., Tilliander, A., & Jönsson, P. G. (2018). The role of process control on the steel cleanliness. *Ironmaking & Steelmaking*, 45(2), 114–124. <https://doi.org/10.1080/03019233.2016.1245917>
3. Berghöfer, A., & Steiner, B. (2012). Usovershenstvovannyi vypusk vysokochistoy stali iz LD-konvertera v kompanii Salzgitter Flachstahl [Improved production of high-purity steel from the LD converter at Salzgitter Flachstahl]. *Chernyye metally*, (7), 39–43. [In Russian].
4. Kamaraj, A., Mandal, G. K., Shanmugam, S. P., & Roy, G. G. (2022). Quantification and analysis of slag carryover during liquid steel tapping from BOF vessel. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 61(2), 202–215. <https://doi.org/10.1080/00084433.2022.2044688>
5. Brämning, M., Björkman, B., & Samuelsson, C. (2016). BOF Process Control and Stopping Prediction Based on Multivariate Data Analysis. *Steel Research International*, 87(3), 301–310. <https://doi.org/10.1002/srin.201500040>
6. Zhang, Z., Bin, L., & Jiang, Y. (2014). Slag detection system based on infrared temperature measurement. *Optik*, 125(3), 1412–1416. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.08.016>
7. Patra, P., Sarkar, A., & Tiwari, A. (2019). Infrared-based slag monitoring and detection system based on computer vision for basic oxygen furnace. *Ironmaking & Steelmaking*, 46(7), 692–697. <https://doi.org/10.1080/03019233.2018.1460909>
8. Zhang, Z., Li, Q., & Yan, L. (2016). Slag detection system based on infrared thermography in steelmaking industry. *Recent Patents on Signal Processing*, 5(1), 16–23. <https://doi.org/10.2174/2210686305666150930230548>
9. Usamentiaga, R., Mollada, J., Garcia, D. F., Granda, J. C., & Rendueles, J. L. (2012). Temperature Measurement of Molten Pig Iron With Slag Characterization and Detection Using Infrared Computer Vision. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 61(5), 1149–1159. <https://doi.org/10.1109/TIM.2011.2178675>
10. Chakraborty, B., & Sinha, B. K. (2011). Development of caster slag detection system through imaging technique. *International Journal of Instrumentation Technology*, 1(1), 84. <https://doi.org/10.1504/IJIT.2011.043599>
11. Wu, F., & Wang, Y. Z. (2005). Study on ladle slag carry-over detection using video system (in Chinese). *Industrial Control Computer*, 18(3), 38–47.
12. Eysn, M. (1983). Pneumatic slag stopper for oxygen converters. *Iron and Steel Engineer*, (10), 53–55.
13. Howanski, W. S., Kalep, T., & Swift, T. (2006). Optimizing BOF slag control through the application of refractory darts. *Iron and Steel Technology*, 3, 36–43.
14. Lee, S.-J., Kim, S.-J., & Lee, H.-G. (2016). New idea of suppressing free surface vortex during tapping liquid steel from converter. *Metals and Materials International*, 22(1), 136–142. <https://doi.org/10.1007/s12540-015-5428-0>
15. Pat. 2795226. China, IPC C21C5/46. Converter slag plug / Zhang Chunhui, Li Huifeng, Zhu Jianzhong, He Quan. - No. 200520108497.5; appl. 27.05.2005. publ. 12.07.2006.
16. Kamaraj, A., Mandal, G. K., & Roy, G. G. (2019). Control of slag carryover from the BOF vessel during tapping: BOF cold model studies. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 50(1), 438–458. <https://doi.org/10.1007/s11663-018-1432-3>
17. Ashok, K., Roy, G. G., & Mandal, G. K. (2017). Modeling and simulation studies on BOF tapping process. In 3rd International Conference of Ironmaking and Steelmaking (pp. 403–406).
18. Patent Ukrainy na vynakhid [Ukrainian patent for invention]. Application number а202303647 from 28.07.23; Nemsadze H.H., Sharandin K.M., Smirnov O.M., Dzhodzhuia R.A., Riabyi D.V. [in Ukrainian].
19. Patent Ukrainy na korysnu model [Patent of Ukraine for a utility model]. Application number а202303358 from 10.07.23; Nemsadze H.H., Sharandin K.M., Smirnov O.M., Dzhodzhuia R.A., Riabyi D.V.

Received 26.09.2024

## Summary

**O.M. Smirnov**<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of the Department of Magnetohydrodynamics, e-mail: stalevoz@i.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5247-3908>

**L.V. Kamkina**<sup>2</sup>, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Theoretical Foundations of Metallurgical Processes, e-mail: lydmila\_kamkina@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-8329-0917>

**K.M. Sharandin**<sup>3</sup>, PhD (Engin.), General Director, e-mail: sharandin@gir.ua

**D.V. Riabyi**<sup>3</sup>, PhD (Engin.), Junior Researcher of the Department of Magnetohydrodynamics, e-mail: Ryaboiy@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-8728-3175>

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

*Ukrainian State University of Science and Technologies, Institute of Industrial and Business Technologies (Dnipro, Ukraine)*

*GIR-ENGINEERING LLC (Dnipro, Ukraine)*

## Complex BOF Slag Cut-Off System Using Developed Functional Devices Produced by GIR-Engineering LLC

*One of the most crucial tasks in a modern BOF shop is to minimize the amount of final slag that enters the ladle during tapping.*

*According to estimates from various researchers and practical experience, the amount of slag entering the ladle during tapping is distributed as follows: up to 25% at the beginning, up to 60% at the end of tapping, and up to 15% when the converter returns to its working position.*

*Today, there are two basic schemes for cutting off converter slag: automatic («active») and «passive». The primary automatic schemes include a «gas-dynamic» cut-off system and a «slide gate» type system. An affordable and effective alternative is the scheme of a «passive» primary and secondary BOF slag cut-off system using functional refractory devices.*

*The industrial facilities of GIR-Engineering LLC and PTIMA NAS of Ukraine have developed a «passive» scheme for the complex BOF slag cut-off system. This scheme includes two systems: a primary cut-off with a plastic «tampon» type stopper and a secondary cut-off with a refractory «ball» or «dart» type stopper. Both systems work with manual applicators, which minimizes the capital costs of introducing them into the production chain.*

*During the 2021-2024 period, at the PrJSC «KametStal» plant in Kamianske, Ukraine (BOF with a capacity of 250 tons – 2 units), successful industrial tests of the developed BOF slag cut-off system were carried out.*

*The total economic effect from implementation was ≈ 1.2 USD per ton of steel.*

## Keywords

*BOF, slag, primary cut-off system, secondary cut-off system, stopper, applicator.*