

Камкіна Л.В., Смірнов О.М., Шарандін К.М., Рябий Д.В.

Розвиток «пасивної» системи відсікання кінцевого конвертерного шлаку та розробка функціональних стопорів

Kamkina L.V., Smirnov O.M., Sharandin K.M., Ryabyi D.V.

Development of a “passive” cut-off system of final bof slag and produced of functional stoppers

Одним з головних інструментаріїв для підвищення якості металопродукції, що виробляється, є операції з виявлення та відсікання шлаку в ході технологічного переливу металу з конвертера в ківш. За оцінками різних дослідників та практичного досвіду, кількість шлаку, що потрапляє в ківш, при випуску сталі з конвертера 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 конвертера до робочого положення. На сьогоднішній день 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 та 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 включає дві системи, первинна відсікання пластичним стопором типу «тампон» і вторинна відсікання вогнетривким стопором типу «куля» / «дротик». Обидві системи працюють із ручними аплікаторами, що мінімізує капітальні витрати на їх впровадження у виробничий ланцюг. В період з липня 2020 до вересня 2020 р. проведено успішні дослідні та дослідно-промислові випробування стопорів первинного відсікання шлаку марок «GIR-TAMP-150-DMK» ККЦ ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» (м. Кам'янське, Україна) у складі двох 250 тн конвертерів. Середній показник рефосфорування металу з використанням розроблених виробів було знижено на 20%. У період 2021-2024 років, в умовах комбінату ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» проведено успішні промислові випробування розробленої комплексної системи відсікання конвертерного шлаку. Сумарний економічний ефект від впровадження становить $\approx 1,2$ USD/тн сталі.

Ключові слова: конвертер, шлак, первинне відсікання, вторинне відсікання, стопор, тампон.

One of the main tools for improving the quality of produced metal products is operations to detect and cut-off slag during the technological metal transfer from BOF to the ladle. According to estimates from various researchers and practical experience, the amount of slag entering the ladle during the tapping is distributed as follows: up to 25% - at the beginning, up to 60% - at the end of the 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 main automatic schemes include a “gas-dynamic” cut-off system and a “slide gate” type system. An affordable and effective alternative is the scheme of “passive”, primary and secondary BOF slag cut-off system, using functional refractory devices. At the industrial facilities of GIR-Engineering LLC, together with PTIMA NAS of Ukraine, has developed a “passive” scheme for the complex BOF slag cut-off system. It includes two systems, primary cut-off with a plastic “tampon” type stopper and secondary cut-off with the refractory “ball” / “dart” type stopper. Both systems work with manual applicators, which minimizes the capital costs of introducing them into the production chain. During the period from July 2020 to September 2020, successful experimental and pilot-industrial tests of primary cut-off slag stoppers “tampon” type, “GIR-TAMP-150-DMK” brand, were carried out in steelmaking shop of PrJSC “KAMET-STAL” (Kamianske, Ukraine) consisting of two 250-ton capacity BOF units. The average rephosphorization rate using the developed products was reduced by 20%. During 2021-2024 years, at the PrJSC “KAMET-STAL” plant, successful industrial tests of the developed complex BOF slag cut-off system were carried out. The total economic effect from implementation was ≈ 1.2 USD per ton of steel.

Key words: bof, slag, primary cut-off system, secondary cut-off system, stopper, tampon.

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

Однією з важливих завдань, що вимагають вирішення в умовах сучасного конвертерного цеху, є скорочення кількості кінцевого технологічного шлаку, що потрапляє в ківш під час випуску рідкого металу з плавильного агрегату. В першу чергу це

виявлення та відсікання шлакового розплаву в ході технологічного переливу [2, 3].

За оцінками різних дослідників і практичного досвіду, кількість шлаку, що потрапляє в ківш, під час випуску сталі з конвертера 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 конвертера у робоче положення.

Схему випуску плавки та етапів потрапляння шлаку через лютку до ківша наведено на рис. 1.

© Камкіна Л.В. – д.т.н., проф. УДУНТ
Смірнов О.М. – д.т.н., проф. ФТІМС, м.Київ
Шарандін К.М. – к.т.н., ТОВ «ГІР-Інжиніринг»
Рябий Д.В. – к.т.н., ТОВ «ГІР-Інжиніринг»

© Kamkina L.V. – d.t.s., profssor, USUUT
Smirnov O.M. – d.t.s., profssor, Kyiv
Sharandin K.M. – c.t.s., GIR-ENGINEERING», LLC
Ryabyi D.V. – c.t.s., GIR-ENGINEERING», LLC



This is an Open Access article under the CC BY 4.0 license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

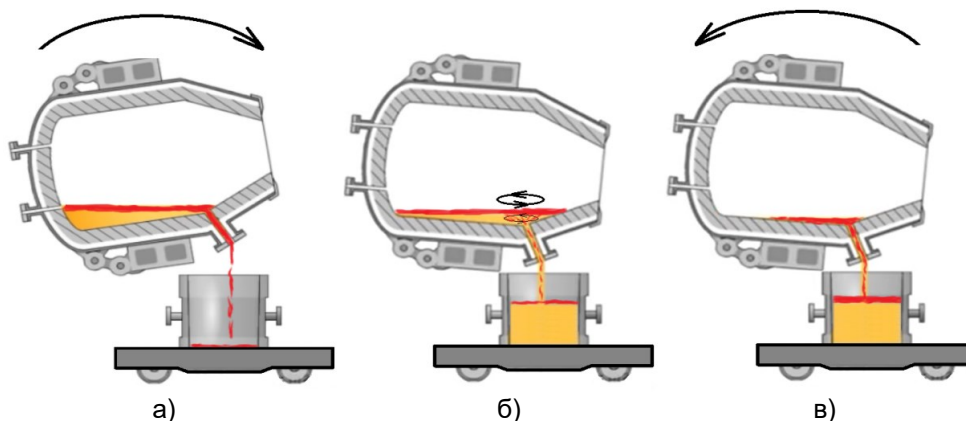


Рисунок 1. Схематичне зображення випуску плавки з конвертера та етапи потрапляння шлаку до сталерозливного ківша: а) початок випуску, б) кінець випуску (формування вікнини), в) повертання («підйом») конвертера в робоче положення.

На сьогоднішній день існують декілька основних методів автоматичного визначення проникнення шлаку в струмінь металу: електромагнітний, вібраційний та інфрачервоний [4-9].

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

Прикладом такого пристрою може бути "газодинамічна" система відсікання шлаку та система типу «шиберний» затвор [10].

Альтернативою для автоматичних методів/систем відсікання шлаку, що передбачають відповідне обладнання, на практиці широке застосування отримали так звані, "пасивні" методи первинного та вторинного відсікання шлаку. Дія таких методів

заснована на прояві певних фізичних ефектів та властивостей функціональних елементів, тобто шлаковідсічних стопорів [11-13].

Фізичне моделювання дозволяє візуалізувати та кількісно оцінити більшість фізичних процесів, що супроводжують процес відсікання шлаку [14, 15].

Для оцінки гідродинаміки рідкої шлакометалевої ванни конвертера на етапі випуску плавки, а також вивчення процесів які супроводжують первинне і вторинне відсікання кінцевого шлаку за допомогою функціональних елементів було створено фізичну модель конвертера.

Масштаб моделі 1:6 по відношенню до типових геометричних розмірів 160 тн агрегату.

Лабораторна установка фізичної моделі конвертера представлена на рисунку 2.



Рисунок 2. Загальний вигляд установки фізичної моделі конвертера в масштабі 1:6: 1 – корпус моделі із прозорого оргскла; 2 – лъотка (сталевипускний канал); 3 – опорні цапфи; 4 – перекладини жорсткості; 5 – опорна вісь; 6 – вертикальні опори; 7 – днище; 8 – електромеханічний привід нахилу моделі конвертера.

На першому етапі моделювання досліджували характер руху потоків шлакометалевої ванни в процесі випуску плавки.

На рисунку 3 показано зміну гідродинамічної

картини виливу плавки через сталевипускний канал льотки конвертера у часі без використання систем відсікання шлаку – вільний вилив.

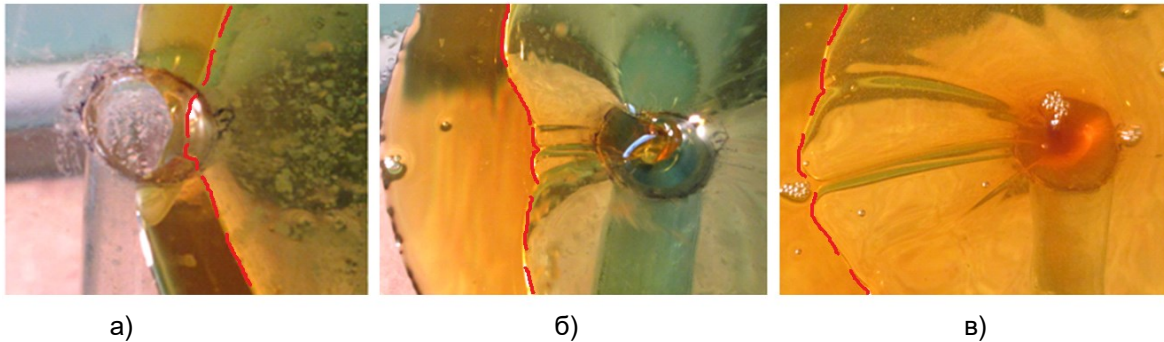


Рисунок 3. Кінограма нахилу конвертера до випуску і відповідно виливу рідкої ванни через сталевипускний канал льотки конвертера (фізичне моделювання – вільний вилив): а) 1 сек. виливу, б) 20 сек. виливу, в) 25 сек. виливу; червоний контур – межа розділу фаз шлак/метал.

Встановлено, що на 1-й секунди (рис. 3, а) спостерігається випереджаюче потрапляння шлаку до каналу за рахунок «набігання» шлаку перед металом – первинний кінцевий шлак. Наприкінці моделювання випуску 20-й – 25-й секундах (рис. 3. б), в) видна чітка динаміка формування і розвитку вихору металу з затягуванням шлаку у часі.

Для запобігання потрапляння першої порції

шлаку (випереджаюче «набігання») до сталевипускного каналу встановлювали пластичну пробку у вигляді циліндричного стопору – «тампону».

На рисунку 4 показано сталу гідродинамічну картину перед початком виливу плавки через сталевипускний канал льотки конвертера при використанні пластичного стопору – відтермінований вилив.

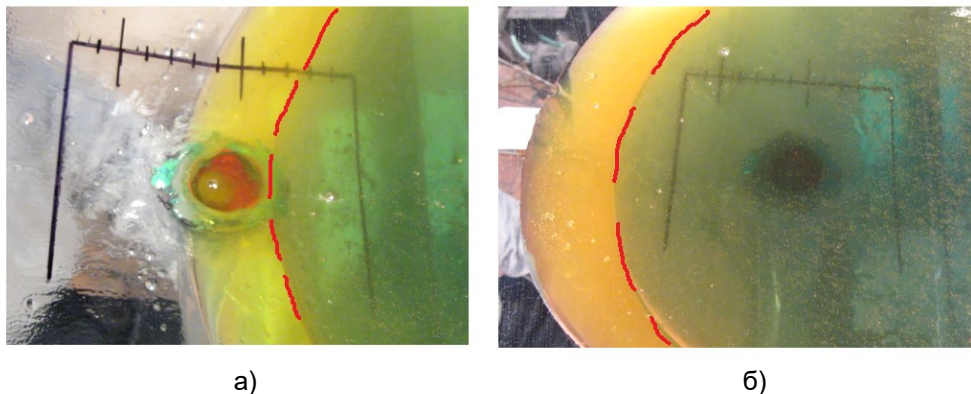


Рисунок 4. Кінограма нахилу конвертера до випуску і відповідна затримка виливу рідкої ванни через сталевипускний канал льотки (фізичне моделювання – пластичний стопор первинного відсікання): а) 1 сек. виливу, б) 5 сек. виливу; червоний контур – межа розділу фаз шлак/метал.

Стопор закупорював льотку на деякий час припиняючи вилив, а шлак, що потрапив до каналу спливав догори за рахунок різниці у щільності з металом.

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. А за рахунок правильно підібраною шихтовки матеріалу, «тампон» швидко руйнується виконав свою функцію та не затримує технологічну операцію виливу.

На наступній стадії використовували методи високотемпературного фізичного моделювання на печі Таммана. Так, для аналізу існуючих зразків

(імпортного виробництва) та розробки вітчизняних аналогів пластичних виробів – стопорів первинного відсікання розроблено оригінальну методику яка включала 2 основні етапи.

Спершу аналізували еталонні зразки пластичних матеріалів стопорів європейських виробників. 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». В таблиці 1 наведено основні фізико-хімічні показники матеріалів лабораторних зразків.



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

Таблиця 1. Фізико-хімічні показники пластичного матеріалу стопора; порівняльні зразки.

№ зразка	Хімічний склад**, %					в.п.п., %	Вологість, W, %
	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	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.

В якості визначального параметру пластичного матеріалу обрано показник «в.п.п., %» (за температури 1150 °С). Цей параметр відповідає водночас за герметизацію сталевипускного каналу до початку виливи та за механічну міцність «пробки» проти феростатичного тиску стовпа металу. Також, від

показника «в.п.п., %» напряду залежить його уявна щільність та відкрита поруватість після спікання.

У якості прикладу на рисунку 6 показано зовнішній вигляд лабораторних зразків пластичного матеріалу стопора після прожарювання при 1150 °С.

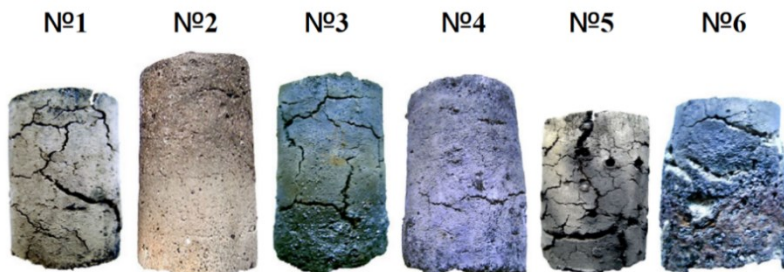


Рисунок 6. Зовнішній вигляд лабораторних зразків пластичного матеріалу стопора після прожарювання при 1150 °С, де зразки №1, №3 – імпортного виробництва («еталонні»); №2, №4-№6 – розроблені склади – аналоги.

Отримано емпіричні залежності відкритої поруватості та механічної міцності пластичного вогнетривкого матеріалу від вмісту вільного С (вуглецю) у шихтовці та показника «в.п.п.,%» (після прожарювання при 1150 °С).

Як видно з рисунку 6 з огляду на таблицю 1 чим більше вміст вільного С (вуглецю) в матеріалі та показник «в.п.п.,%» тим більша відкрита поруватість в спеченому зразку та обернено пропорційна величина механічної міцності.

В промислову розробку в якості основного компоненту функціонального виробу було взято зразок

пластичної маси під номером 5, та присвоєно марку «GIR-TAMP-DMK».

Методи вторинного відсікання шлаку наприкінці випуску плавки досліджували з використанням фізичного (холодного) моделювання. У якості функціональних виробів «поплавкового» типу обрано дві найбільш поширені і прості в використанні конструкції: стопор – «куля», та стопор – «дротик».

На рисунку 7 представлена схема третього модельного етапу вторинного відсікання кінцевого шлаку.

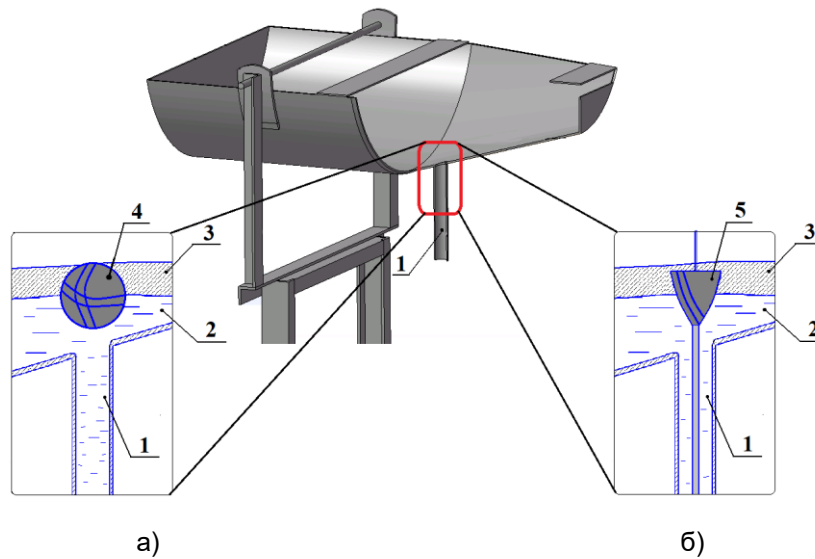


Рисунок 7. Схематичне зображення третього модельного етапу вторинного відсікання кінцевого шлаку з використанням штучних функціональних виробів: а) стопор типу «куля», б) стопор типу «дротик»; 1- сталевипускний канал, 2 – рідкий метал, 3 – рідкий шлак, 4 – «куля», 5 – «дротик».

Обидві моделі виготовлялись з пластиліну і пінополістиролу за для досягнення заданої щільності. Уявна щільність моделей підбиралася як середнє значення між металом та шлаком (між водою і трансформаторним маслом).

Моделі стопорів вводили наприкінці випуску, у останній третині виливу, в той час як починали спостерігати вихор у зоні сталевипускного отвору.

Для гасіння вихору і затягування шлаку

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

На рисунку 8 в якості прикладу представлено кінограму процесу моделювання відсікання стопором типу «дротик».

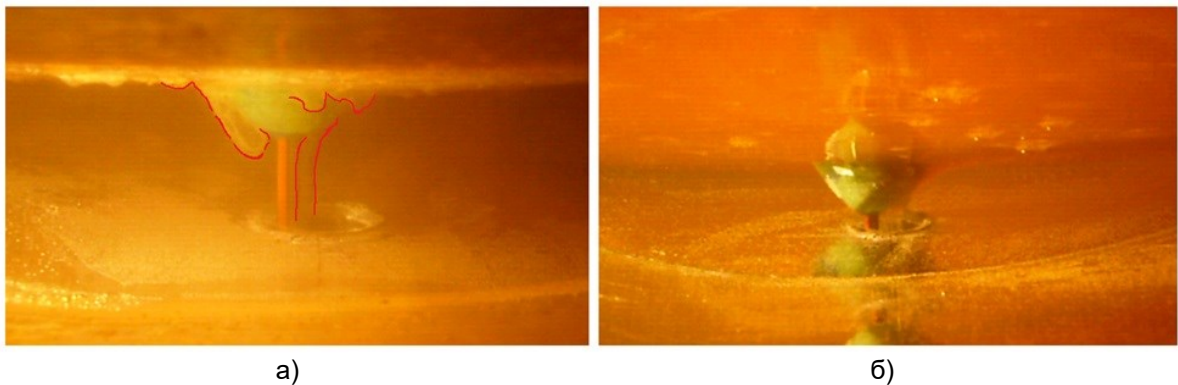


Рисунок 8. Кінограма процесу вторинного відсікання шлаку на моделі конвертера: а) момент подачі стопору типу «дротик» - вихор навколо головки стопору (червоний контур), б) кінець виливу металу – вихор навколо головки відсутній.

Так, на рисунку 8 а) наведено початковий етап відсікання, а саме момент подачі стопору типу «куля» у останній 1/3 часу виливу. Видно турбулентний вихор навколо голівки стопору і часткове затягування покривного шлаку до сталевипускного каналу. Порції шлаку, що затягується виділено червоним контуром. На рисунку 8 б) показано заключний етап відсікання. З рисунка видно, що характер витікання останніх порцій металу є стаціонарним, ламінарним. Вихор і затягування шлаку до

сталевипускного отвору відсутні.

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

За аналогічною методикою проводили моделювання відсікання шлаку з використанням стопорів типу «куля». Спостерігалися аналогічні закономірності.

За результатами фізичного моделювання і аналізу промислових даних фізико-хімічного складу кінцевих шлаків на вітчизняних підприємствах в промислову розробку взято 2-а види стопорів вторинного відсікання шлаку типу «куля» марки «GIR-Ballstop-KS» і типу «дротик» марки «GIR-Dart-AMKR».

Компанією ТОВ «ГІР-Інжиніринг» разом з Фізико-технологічним інститутом металів та сплавів НАН України розроблено комплексну промислову систему яка включає в себе первинне та вторинне відсікання кінцевого конвертерного шлаку.

На промислому майданчику компанії ТОВ «Гір-Інжиніринг» (м. Дніпро) в період з 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., та стопорів вторинного відсікання шлаку типу «куля» марки «GIR-Ballstop-KS» в кількості 100 шт. (50 шт. Ø 250 мм та 50 шт. Ø 220 мм).

На рисунку 9 наведено схематичний та зовнішній вигляд пластичного стопору типу «тампон» марки «GIR-TAMP-DMK-150».

На рисунку 10 наведено схематичний та загальний вид стопору типу «куля» марки «GIR-Ballstop-KS-250» вторинного відсікання кінцевого шлаку.

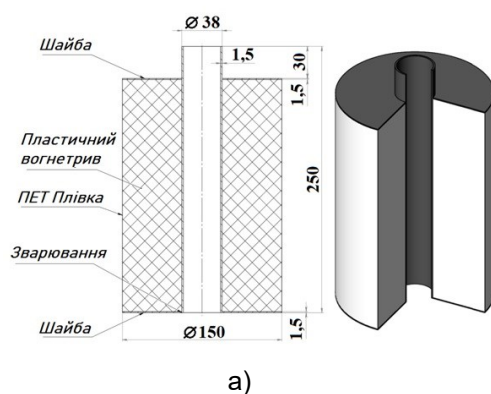


Рисунок 9. Пластичний стопор первинного відсікання конвертерного шлаку марки «GIR-TAMP-150-DMK» ЧАО «КАМЕТ-СТАЛЬ»: а) схематичне зображення (креслення), б) зовнішній вигляд.

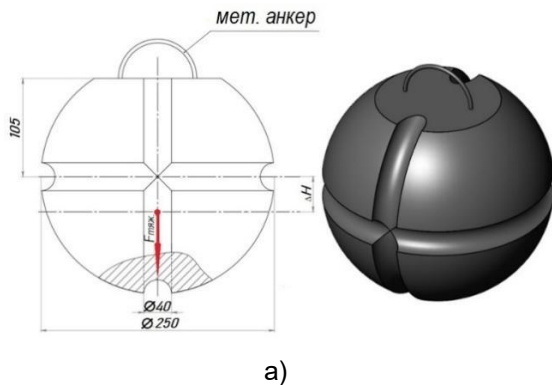


Рисунок 10. Стопор вторинного відсікання конвертерного шлаку марки «GIR-Ballstop-KS-250» ЧАО «КАМЕТ-СТАЛЬ»: а) схематичне зображення (креслення), б) зовнішній вигляд (пакування).

Партії зроблені в адрес ПрАТ «Камет-Сталь» для 250 тн конвертерів. Також розроблені і поставлені ручні механічні аплікатори/маніпулятори для доставки функціональних виробів до сталевипускного каналу і порожнини конвертеру.

Система первинного відсікання кінцевого конвертерного шлаку виробництва ТОВ «ГІР-Інжиніринг» 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 11.

Так, після шихтовки конвертера, за допомогою ручного маніпулятора типу «штанга» (рисунк 11. поз. 1) в сталевипускний канал льотки (рисунк 11.

поз. 2) встановлюють стопор (рисунк 11. поз 3). Стопор складається з несучої трубки з опорним нерухливим нижнім торцевим і притисним рухливим верхнім фланцями, між якими розміщена пластична вогнетривка «пробка» на основі алюмосилікатів, що містять легкоплавкі й тугоплавкі компоненти. Легкоплавкі й тугоплавкі компоненти в алюмосилікатах узяті в кількості, що забезпечує їх наступне співвідношення (0,15-0,24):(0,85-0,76), відповідно, при цьому легкоплавкі компоненти узяті фракцією 0-1 мм, а щонайменше 20 % від загальної кількості тугоплавких компонентів узяті фракцією 3,1-4 мм [16].

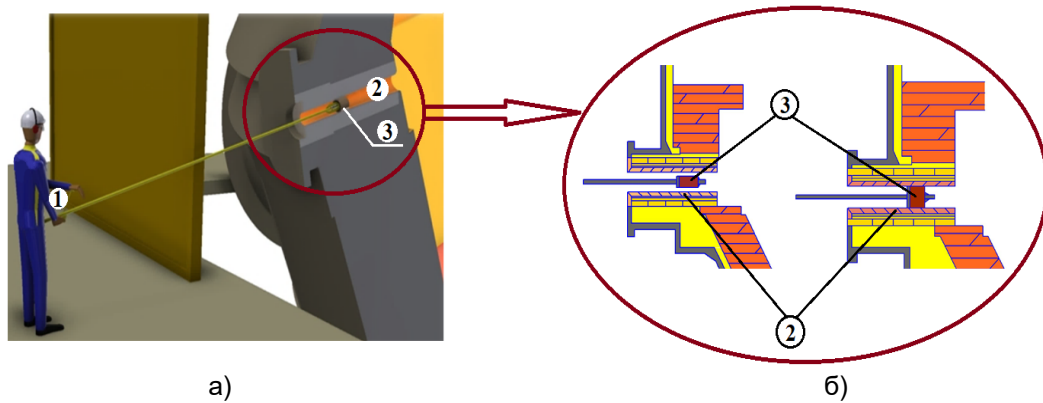


Рисунок 11. Загальний вигляд а) та схематичний вигляд б) системи первинного відсікання кінцевого конвертерного шлаку: 1 – механічний аплікатор (маніпулятор) з ручним приводом для встановлення пластичного стопора у лютку, 2 – сталевипускний канал (лютка), 3 – функціональний пластичний стопор типу «тампон».

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

Для випуску плавки конвертер нахиляють у бік зливу. До цього часу матеріал пробки вже спікається й щільно закупорює лютку. Спечена в лютці вогнетривка маса перешкоджає влученню в 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

догоди, не потрапляючи в лютку, при цьому спечена «пробка» починає проплавлятися й руйнується під феростатичним тиском стовпа металу й шлаку. Лютка звільняється й 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 12.

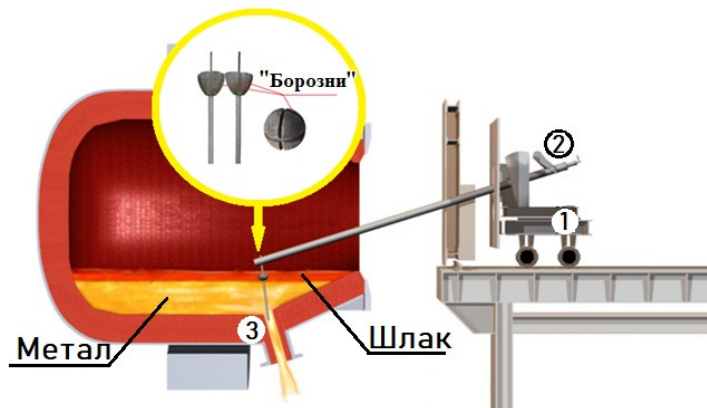


Рисунок 12. Загальний схематичний вигляд системи вторинного відсікання кінцевого конвертерного шлаку: 1 - аплікатор (маніпулятор) типу «візок» для подачі стопору в порожнину конвертера, 2 – механічний привід від'єднання стопору від штанги, 3 – сталевипускний канал (лютка).

Так, під час випуску плавки з конвертера, після зливу 2/3 – 3/4 плавки, вогнетривкий стопор поміщається у порожнину агрегату, до зони лютки (рис. 12, поз. 3) за допомогою спеціального маніпулятора типу «візок» (рис. 12, поз.1) з ручним механічним приводом (рис. 12, 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 мінімізація затягування шлаку

стопор має спеціальну конструкцію. Він має верхню та нижню частини та симетричний відносно вертикальної площини.

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

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

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.

Варіювання геометричних розмірів стопору в діапазоні 220 - 300 мм дозволяє врахувати в'язкість та товщину шару шлаку, характерні для конкретного виробництва, а також внутрішній діаметр сталевипускного каналу [17].

Уявна щільність тіла стопора як правило знаходиться в межах 3,7-4,1 кг/м³, що забезпечує розташування пристрою на межі розділу шлак-метал.

У період з 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 в 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» в кількості 1 шт.;
- Вогнетривкі стопори типу «куля» марок «GIR-BALLSTOP-KS-220» (Ø 220 мм) в кількості 50 шт., «GIR-BALLSTOP-KS-250» (Ø 250 мм) в кількості 50 шт.;
- механічний ручний аплікатор/маніпулятор типу «візок» марки «GIR-MAN-KS-2» в 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 випуск, кількість покривного шлаку перед АКП.

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

Витрати феросплавів, таких як феросиліцій (FeSi65) та 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 CaF₂ на плавку скорочено в середньому на 13%, що також позитивно впливає на стійкість футерівки сталковша.

Сумарний очікуваний економічний ефект від впровадження комплексної системи первинного і вторинного відсікання шлаку складав ≈ 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.

Перелік посилань

1. P. C. Pistorius, Slag carry-over and the production of «clean» steel, J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 119 (2019), 557–561. <http://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/kn01/2019>
2. Steneholm K, Andersson NAI, Tillander A, Jönsson PG. The role of process control on the steel cleanliness. Ironmaking & Steelmaking, 2018, 45(2) pp. 114–124. doi:10.1080/03019233.2016.1245917
3. 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), pp. 202–215. <https://doi.org/10.1080/00084433.2022.2044688>
4. M. Brämning, B. Björkman, C. Samuelsson, BOF process control and slopping prediction based on multivariate data analysis, Steel Res. Int., 87 (2016), pp. 301–310. <https://doi.org/10.1002/srin.201500040>
5. 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>
6. P. Patra, A. Sarkar, A. Tiwari, Infrared-based slag monitoring and detection system based on computer vision for basic oxygen furnace, Ironmaking & Steelmaking, 46 (2019), pp. 692–697. <https://doi.org/10.1080/03019233.2018.1460909>
7. Z. Zhang, Q. Li, L. Yan, Slag detection system based on infrared thermography in steel making industry, Recent Pat. Signal Process., 5 (2015), pp. 16–23. <https://doi.org/10.2174/2210686305666150930230548>
8. 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), pp. 1149–1159. <https://doi.org/10.1109/TIM.2011.2178675>
9. Chakraborty, B. K. Sinha, Development of caster slag detection system through imaging technique, Int. J. Instrum. Technol., 1 (2011), pp. 84–91. <https://doi.org/10.1504/IJIT.2011.043599>
10. F. Wu, Y. Wang, A method for detecting the slag transferring from ladle to tundish based on video system, Ind. Control Comput., 18 (2005), pp. 38–47.
11. Eysn M. Pneumatic slag stopper for oxygen converters / M. Eysn // Iron and Steel Engineer. – 1983. – №10. – pp. 53 – 55.
12. W. S. Howanski, T. Kalep, T. Swift, Optimizing BOF slag control through the application of refractory darts, Iron Steel Technol., 3 (2006), 36–43.
13. 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>
14. Пат. 2795226. Китай, МПК C21C5/46. Пробка конвертерного шлаку / Чжан Чуньхуей, Ли Хуейфен, Чжу Цзяньчжун, Хе Цюань. - № 200520108497.5; заяв. 27.05.2005. опубл. 12.07.2006.
15. 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), pp. 438–458. <https://doi.org/10.1007/s11663-018-1432-3>

16. 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.
17. 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.
18. 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.

References

1. Pistorius, P. C. (2019). Slag carry-over and the production of «clean» steel. *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.*, 119(6), 557–561. <http://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/kn01/2019>
2. Steneholm, K., Andersson, N. A. I., Tillander, A., & Jönsson, P. G. (2018). The role of process control on the steel cleanliness. *Ironmaking & Steelmaking*, 45(2), 114–124. <http://doi.org/10.1080/03019233.2016.1245917>
3. 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. *Can. Metall. Q.*, 61(2), 202–215. <https://doi.org/10.1080/00084433.2022.2044688>
4. Brämning, M., Björkman, B., & Samuelsson, C. (2016). BOF process control and slopping prediction based on multivariate data analysis. *Steel Res. Int.*, 87(3), 301–310. <https://doi.org/10.1002/srin.201500040>
5. 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>
6. 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>
7. Zhang, Z., Li, Q., & Yan, L. (2015). Slag detection system based on infrared thermography in steel making industry. *Recent Pat. Signal Process.*, 5(1), 16–23. <https://doi.org/10.2174/2210686305666150930230548>
8. Usamentiaga, R., Molleda, 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 Trans. Instrum. Meas.*, 61(5), 1149–1159. <https://doi.org/10.1109/TIM.2011.2178675>
9. Chakraborty, B., & Sinha, K. (2011). Development of caster slag detection system through imaging technique. *Int. J. Instrum. Technol.*, 1(1), 84–91. <https://doi.org/10.1504/IJIT.2011.043599>
10. Wu F., & Wang Y. (2005). A method for detecting the slag transferring from ladle to tundish based on video system. *Ind. Control Comput.*, 18, 38–47
11. Eysn, M. (1983). Pneumatic slag stopper for oxygen converters. *Iron and Steel Engineer*, (10), 53 – 55
12. Howanski, W. S., Kalep, T., Swift, T. (2006). Optimizing BOF slag control through the application of refractory darts. *Iron Steel Technol.*, 3, 36–43
13. Lee, S. J., Kim, S. J. & Lee, H. G. (2016). New idea of suppressing free surface vortex during tapping liquid steel from converter. *Met. Mater. Int.*, 22, 136–142. <https://doi.org/10.1007/s12540-015-5428-0>
14. Chunkhuei, Ch., Khueifen, L., Tszianchzhun, Ch., & Tsuan, Kh. (2006). Probka konverternoho shlaku. (Patent No. 2795226). China
15. Kamaraj, A., Mandal, G. K., & Roy, G. G. (2019). Control of slag carryover from the BOF vessel during tapping: BOF cold model studies. *Metall. Mater. Trans. B*, 50, 438–458. <https://doi.org/10.1007/s11663-018-1432-3>
16. Kamaraj, A., Roy, G. G., & Mandal, G. K. (2017). Modeling and Simulation Studies on BOF Tapping Process. In *3rd International Conference of Ironmaking and Steelmaking*, Kanpur, pp. 403–406
17. Nemsadze, H. H., Sharandin, K. M., Smirnov, O. M., Dzhodzhuia, R. A., & Riabyi, D. V. (2023). Sposib vidsichennia kintsevoho konverternoho shlaku pry vypusku plavky cherez lotku konvertera. (Patent application No. a202303647). <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1752362/>
18. Nemsadze, H. H., Sharandin, K. M., Smirnov, O. M., Dzhodzhuia, R. A., & Riabyi, D. V. (2023). Prystrii dlia vidsichennia kintsevoho konverternoho shlaku pry vypusku plavky cherez lotku konvertera. (Patent application No. a202303358)

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 15.05.2024
Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.08.2024