

А.П. Шевченко, д.т.н., проф., пров.наук.співр., ORCID 0000-0003-0867-6825

І.О. Маначин, к.т.н., с.н.с., ORSID 0000-0001-9795-6751

Б.В. Двоскін, к.т.н., с.н.с., ORSID 0000-0003-2891-7833

В.Г. Кисляков, к.т.н., с.н.с., зав. відділом, ORSID 0000-0002-1775-5050

О.С. Вергун, д.т.н., с.н.с., ORSID 0000-0001-5493-9214

С.А. Шевченко, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-9287-9177

В.П. Петруша, пров. інж. ORCID 0000-0002-1031-3241

Інститут чорної металургії ім. З.І.Некрасова НАН України

О.М. Башмаков, к.т.н., технічний директор, ПП «ЭКОТЕХСЕРВИС»

РОЗРАХУНКОВО-АНАЛІТИЧНА ОЦІНКА І ПРОМИСЛОВА ПЕРЕВІРКА ПОКАЗНИКІВ КОВШОВОЇ ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ ЧАВУНУ З ВИКОРИСТАННЯМ РІЗНИХ РЕАГЕНТІВ

Анотація. Обґрунтовано необхідність комплексного підходу в оцінці та виборі технології позапічної десульфурації чавуну. Показано, що одним з основних параметрів і показників процесу є витрата реагенту, яка визначає всі основні характеристики процесу. Порівняльний аналіз показників свідчить також про те, що при KR-процесі збільшенні маси чавуну в ковші знижується ефективність десульфурації, так як перехід від ковша з масою чавуну 80 і 100 т до великих ковшів (260 т) супроводжується зменшенням питомого ступеня десульфурації, збільшуючи витрату реагенту на одиницю видаленої сірки. Значні питомі витрати реагентів (аж до 8-17 кг/т чавуну) і тривалість перемішування (аж до 8-20 хв.), а також циклу - до 25-68 хв. обумовлюють відчутні втрати температури чавуну - в середньому 40-42 °С, а в ряді режимів десульфурації - аж до 92-128 °С. Обумовлено це тим, що зі збільшенням маси чавуну погіршуються масообмінні процеси між шлаком і рідким чавуном ковша. Найбільша питома витрата реагентів в KR-процесі визначається у результаті найбільших витрат при реалізації цього процесу. Найменші питомі витрати при моноінжекції магнію зумовлюють найменші витрати при промисловому освоєнні цього процесу. Фактичні показники промислових продувок свідчать про те, що моноінжекція зернистого магнію характеризується найменшими витратами реагентів - в середньому 0,42-0,55 кг/т чавуну, найменшою тривалістю операції десульфурації - в середньому 5,5-7,7 хв. і в той же час забезпеченням аж до супер глибокої десульфурації чавуну - аж до 0,0003-0,001 %, ступенем десульфурації - до 99 %, високою інтенсивністю видалення сірки - в середньому 12-14,4 %/хв., високим ступенем засвоєння реагенту - в середньому 75-92 %. Представлені фактичні дані по технології застосування KR-процесу (CaO + CaF₂), коінжекції вапна з магнієм (CaO + Mg) і моноінжекції зернистого магнію за українською технологією вдування. Витрати при десульфурації процесами KR - коінжекція - моноінжекція знаходяться в співвідношенні 3:2:1. Обґрунтовано перевагу інжекційних процесів десульфурації чавуну.

Ключові слова: позапічна десульфурація чавуну, порошкове вапно, гранульований магній, фурми, ефективність десульфурації.

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2020. - Вип.34

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2020. – Collection 34

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2020. – Vypusk 34

Посилання для цитування: Шевченко А.П., Маначин І.О., Двоскин Б.В., Кисляков В.Г., Бацмаков А.М., Вергун О.С., Шевченко С.О., Петруша В.П. Розрахунково-аналітична оцінка і промислова перевірка показників ковшової десульфурзації чавуну з використанням різних реагентів. //«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2020. - Вип.34. – С.73-89. (In Ukrainian) DOI 10.52150/2522-9117-2020-34-73-89

Постановка задачі. Необхідність поліпшення техніко-економічних показників виплавки чавуну і сталі [1-3], а також потреба, яка значно виросла в застосуванні низькосірчаної продукції змусили багато металургійних підприємств застосовувати технології і засоби для видалення сірки, в т.ч. позапічної десульфурзації чавуну в ковшах [1,4-7]. В останні роки споживачі знесірченого чавуну посилили вимоги до процесу десульфурзації в наступних напрямках:

1. Забезпечити отримання значної частини чавуну з вмістом сірки $\leq 0,005$ %, в т.ч. особливо чистого за сіркою $\leq 0,001-0,002$ %).
2. Істотно скоротити тривалість циклу операцій у позапічній його підготовці чавуну до конвертації - аж до ≤ 20 хв. для забезпечення режиму роботи «плавка на плавку».
3. Знизити втрати температури рідкого чавуну.
4. Зменшити втрати чавуну як зі шлаком.
5. Зменшити матеріало- енергетичні витрати при експлуатації і собівартість десульфурзації чавуну.
6. Забезпечити найменші капітальні витрати на створення комплексу десульфурзації чавуну і очищення його від шлаків.
7. Гарантувати стабільну надійність (до 95 % і більш) технології та обладнання в промисловому режимі експлуатації.

Аналіз світового досвіду позапічної десульфурзації чавуну [1,4-7] показує, що найбільш пріоритетними і застосовуваними в даний час є 3 технологічних процеси.

1. Коінжекція вапна і магнею.
2. Моноінжекція зернистого магнею.
3. KR-процес з засипанням вапна і плавикового шпату з подальшим механічним перемішуванням мішалкою.

Зазначені технології багато в чому відповідають сучасним вимогам, але не всім. Для об'єктивної техніко-економічної оцінки цих 3-х технологій десульфурзації чавуну нами був виконаний комплекс досліджень показників позапічної обробки в однакових і рівноцінних умовах рафінування в 2-х групах ковшів з масою чавуну 80-120 т і великовантажних понад 200 т.

KR-процес ($\text{CaO} + \text{CaF}_2$). Показники обробки KR-процесом чавуну в ковшах з масою чавуну 80, 100 і 260 т представлені в таблиці 1. Слід звернути увагу на те, що застосування KR-процесу супроводжується

обов'язковим попереднім скачуванням ковшового вихідного шлаку, наявність якого (в ковші) супроводжується дуже сильним зниженням (в 2-2,5 рази) ефективності десульфурації і нестабільністю результатів (рис. 1). З таблиці 1 також випливає, що вміст сірки в чавуні при KR-процесі (із застосуванням вапна і плавикового шпату) може бути знижено аж до $\leq 0,001-0,002$ %, але при цьому (таблиця 1) питома витрата суміші $\text{CaO} + \text{CaF}_2$ може досягати 8, 9-17,8 кг/т чавуну, а тривалість часу циклу операції до 52-68 хв.

Необхідність збільшення кількості сірки, що видаляється супроводжується збільшенням питомих витрат реагентів (рис. 2 і рис. 3), а також збільшенням тривалості перемішування чавуну в ковшах (рис. 3). Значні питомі витрати реагентів (аж до 8-17 кг/т чавуну) і тривалість перемішування (аж до 8-20 хв.), а також циклу - до 25-68 хв., що обумовлює відчутні втрати температури чавуну - в середньому 40-42 °С (табл. 1), а в ряді режимів десульфурації - аж до 92-128 °С. Порівняльний аналіз показників таблиці 1 свідчить також про те, що при KR-процесі збільшення маси чавуну в ковші знижує ефективність десульфурації, так як перехід від ковша з масою чавуну 80 і 100 т до великих ковшів (260 т) супроводжується зменшенням питомого ступеню десульфурації, інтенсивності видалення збільшує витрати реагенту на одиницю видаленої сірки. Обумовлено це тим, що зі збільшенням маси чавуну погіршуються масообмінні процеси між шлаком і рідким чавуном ковша. Тому зі збільшенням глибини ванни необхідно збільшити інтенсивність перемішування ванни, що рафінується. Ступінь десульфурації чавуну при KR-процесі може бути забезпечений дуже високий - аж до 99,5 % (табл. 1). Підтверджується такий недолік KR-процесу як велике додаткове шлакоутворення, що призводить до великих втрат чавуну - аж до 13,8 кг/т знесірченого чавуну.

Таблиця 1 - Основні показники (за фактичними даними) десульфурації KR-процесом ($\text{CaO} + \text{CaF}_2$) в різних ковшах

№№ пп	Параметр, показник	Хайсинський меткомбінат (КНР)	Циндаоський меткомбінат (новий сталевий завод), КНР	Корпорація CSC, сталевий завод № 2 (Тайвань)
1	Маса чавуну в ковшах, т	<u>64,3–86,8</u> 79	<u>98,1–107,6</u> 101	<u>238,4–270,4</u> 251,4
2	Глибина ванни чавуну, м	біля 2,7	<u>2,8–3,0</u> 2,9	<u>3,3–3,8</u> 3,4
3	Висота "вільного борта", м	біля 0,8	<u>0,6–1,0</u> 0,75	<u>0,8–1,1</u> 0,9

4	Витрати вапномісної суміші, яка завантажуються в ківш (q_p), кг/т.	$\frac{3,4-8,9}{5,1}$	$\frac{2,0-17,8}{6,8}$	$\frac{4,5-11,4}{7,6}$
5	Тривалість перемішування чавуну, хв.	біля 8,4	$\frac{6-13}{8,5}$	$\frac{12,5-20,8}{17,9}$
6	Тривалість циклу операції обробки, хв.	н/д	$\frac{25-52}{36}$	$\frac{28-68}{35}$
7	Вміст сірки в чавуні, %			
	– вихідний $[S]_{\text{вих.}}$	$\frac{0,017-0,062}{0,035}$	$\frac{0,024-0,0112}{0,059}$	$\frac{0,0064-0,0420}{0,0217}$
	– після десульфурації $[S]_{\text{кін.}}$	$\frac{0,001-0,034}{0,010}$	$\frac{0,001-0,035}{0,009}$	$\frac{0,0002-0,0190}{0,0041}$
8	Температура чавуну, °С			
	– вихідна	$\frac{1217-1394}{1327}$	$\frac{1316-1441}{1383}$	н/д
	– після обробки	$\frac{1175-1341}{1286}$	$\frac{1227-1412}{1343}$	$\frac{1200-1371}{1290}$
	– ΔT_q	$\frac{15-92}{42}$	$\frac{21-128}{40}$	н/д
9	Ступінь десульфурації чавуну, %			
	– кінцева (Ст. D), %	$\frac{28-97}{72}$	$\frac{33-99}{85}$	$\frac{32-99,5}{78,4}$
	– питома – D (Ст. D/ q_p), %/кг/т	$\frac{8,5-19,9}{14,1}$	$\frac{5,5-20}{12,5}$	$\frac{4,8-19,4}{10,3}$
10	Інтенсивність десульфурації Ст. (D/ $\tau_{\text{перем.}}$), %/хв.	85	$\frac{4,4-15,1}{10,0}$	$\frac{2,0-7,5}{4,4}$
11	Питома витрата реагенту на сірку видалену ($q_p/\Delta S \cdot 10$), кг/кг	20,5	13,6	43,2
12	Швидкість зниження температури чавуну ($\Delta T_q/\tau_{\text{перем.}}$), °С/хв..	5,3	$\frac{3,5-11,1}{4,7}$	н/д
	Кількість шлаку, видаленого з ковша перед обробкою:			
	– питома ($q_{\text{шл}}$), кг/т чавуну	$\frac{3,75-4,12}{25}$	$\frac{3,0-46,0}{18}$	н/д
14	Кількість шлаку, який додатково утворюється в ковші:			
	– загальна кількість шлаку ($Q_{\text{шл}}$), т/ковш	$\frac{0,54-1,42}{0,82}$	$\frac{0,4-3,5}{1,16}$	$\frac{2,25-5,71}{3,80}$
	– питома ($q_{\text{шл}}$), кг/т чавуну	$\frac{6,8-17,8}{10,2}$	$\frac{4,0-35,6}{11,6}$	$\frac{9,0-22,8}{15,2}$

15	Втрати чавуну: – зі шлаком, що скачується перед десульфурацією чавуну, кг/т чавуну	$\frac{1,12-12,36}{7,5}$	$\frac{0,9-13,8}{5,4}$	7,6
16	Втрати чавуну зі шлаком, що додатково утворюється (при десульфурації) та його скачуванні, кг/т чавуну	$\frac{4,08-10,68}{6,12}$	$\frac{2,4-21,36}{6,96}$	7,6
17	Сумарні втрати чавуну з ковшовим шлаком, що утворюється і видаленим при KR-процесі, кг/т чугуну	$\frac{5,57-27,16}{15,87}$	$\frac{3,6-39,7}{14,18}$	біля 15

Таким чином, KR-процес, що характеризується своєю зовнішньою простотою і можливістю забезпечення дуже низького вмісту сірки в чавуні (аж до $\leq 0,001-0,002$ %), є дуже матеріало-енергозатратним варіантом позапічної десульфурації чавуну. Крім цього капітальні витрати і амортизація у комплексі KR-перемішування в 2 рази більш, ніж у інших процесів позапічної десульфурації.

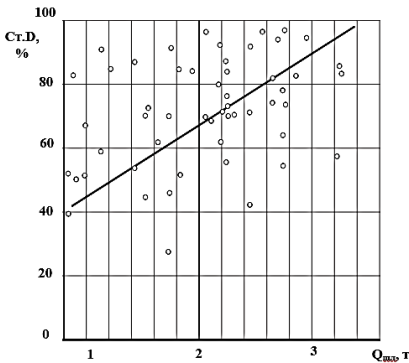


Рисунок 1 – Хайсинський меткомбінат. Процес KR ($\text{CaO} + \text{CaF}_2$). Вплив кількості попередньо видаленого шлаку з ковша ($Q_{\text{шл.}}$) на ступінь десульфурації (Ст.D) чавуну. Маса чавуну в ковші близько 80 т

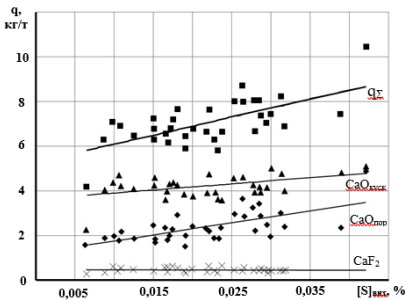


Рисунок 2 – Зміни витрат реагентів (q) при різному вихідному ($[S]_{\text{вих.}}$) в чавуні при KR-процесі на Циндаоському меткомбінаті. Кінцева сірка 0,004 %. Маса чавуну в ковшах 100 т

×- CaF_2 ;
◆- $\text{CaO}_{\text{п}}$ порошковий;
▲- $\text{CaO}_{\text{к}}$ кусковий;
■- всього реагентів.

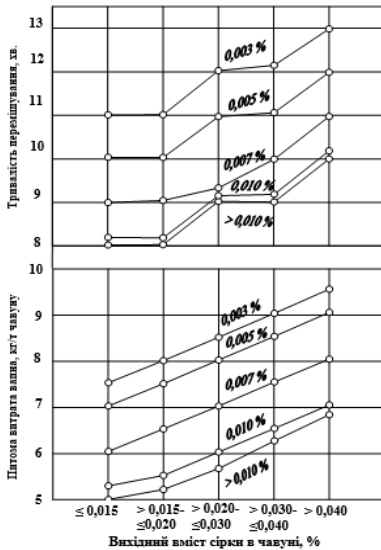


Рисунок 3 – Питомі витрати реагентів (кг/т чавуну) і тривалість перемішування (хв.) при різному вихідному і кінцевому вмісті сірки в чавуні. KR-процес в заливальних ковшах (260 т чавуну) сталевозава № 2 концерна CSC (Тайвань)

— питомі витрати реагентів, (кг/т)
 - - - тривалість перемішування, хв.
 Дані по технологічному регламенту.

Коінжекція вапна в суміші з магнієм. Одним з найбільш вживаних процесів ковшової десульфурзації чавуну є коінжекція меленого вапна в суміші з магнієм через фурму, що занурюється. Його активне поширення обумовлено необхідністю збільшення знесірченої здатності вапна і, разом з цим, нездатністю металургів всіх країн (крім України) раціонально і надійно вводити чавун в магній. Коінжекцію магнію в суміші з вапном застосовують в основі в ковшах з масою чавуну більше 80 т, а вміст магнію у суміші, що вдувається, становить в основі близько 20 %. Наші дані характеризують показники десульфурзації чавуну в ковшах з масою чавуну 110, 180 і 220 т і представлені в таблиці 2, з якої випливає, що коінжекція суміші CaO і Mg також забезпечує зниження сірки в чавуні аж до 0,001 %, але при менших витратах реагентів (в порівнянні з KR-процесом).

Таблиця 2 – Показники десульфурзації чавуну коінжекцією суміші вапна та магнію в ковшах різного типорозміру

№№	Показники	Шаганський МК	Ханданський МК	ПАТ «ДМКД»
1	Маса чавуну в ковшах, т	178	108	223
2	Витрати реагентів, кг/т чавуну:	0,43	0,443	0,51
	- магнію			
	- вапна на вдування Mg			
	- вапна всього			
- реагентів всього	1,73	3,08	3,58	

3	Вміст сірки в чавуні, % - [S] _{вих}	<u>0,006-0,062</u> 0,027	<u>0,006-0,056</u> 0,030	<u>0,017-0,047</u> 0,054
	- [S] _{кін}	<u>0,001-0,047</u> 0,009	<u>0,001-0,041</u> 0,016	<u>0,003-0,110</u> 0,025
4	Температура чавуну: -вихідна	1345	1323	1272
	- після обробки	1330	н/д	1263
	-Δt	15	н/д	10
	- Δt/τ, °C/хв..	1,1	н/д	0,82
5	Показники десульфурації: - Ст. D (ступ. десу.), %	66,7	57,9	56,2
	- D _{Mg} (Ст. D/q _{Mg})	15,6	13,3	11,0
	- Ст. D/τ _{прод.} , %/хв..	3,9	н/д	4,6
	- β _{Mg} (q _{Mg} /Δ[S])	2,4	2,01	1,6
	- β _{реар.} , кг/кг	9,7	14,0	11,2
	τ _{прод.} тривалість продувки	14	н/д	12,2
7	Інтенсивність вдування реагентів в чавун, хв.:			
	- магнію	5,5	н/д	9,4
	- вапна	8,0	н/д	36,6
8	Додатково утворюється шлаку, кг/кг чавуну	3,46	6,16	7,16
9	Втрати чавуну зі шлаком, що додатково утворюється, кг/кг чавуну	1,75	3,10	3,6
10	Ступінь засвоєння магнію на сірку, (K _{Mg} ^S), %	31,8	37,7	47,7
11	Вміст сірки в сталі, %	н/д	н/д	0,031

Примітка: в чисельнику – середні значення, (K_{Mg}^S) – на всіх підприємствах,
в знаменнику – середні значення без урахування Алчевського меткомбінату.

Тривалість операції введення (вдування) реагентів, як правило, не перевищує 15-16 хв., що супроводжується меншими втратами температури чавуну. Тому коінжекція суміші CaO і Mg пов'язана з меншими (в порівнянні з KR) матеріальними і енергетичними затратами, але має більш складну структуру, а також більш складні системи автоматизації та управління. При оцінці процесу коінжекції необхідно враховувати, що балансове співвідношення вапна і магнію дорівнює не 4:1, а 6:1, тобто вапна витрачається більше, ніж публікується в [8,9], так як дві частини вапна (по відношенню магнію) витрачається в період занурення і підйому фурми з чавуну. Цей захід здійснюється для збереження чистоти (від заметалювання) каналу фурми.

На рис. 4 представлена, отримана нами номограма залежності питомої витрати магнію (що вдувається в чавун, коінжекцією з вапном в 250-тонні заливальні ковші ДМКД) від вихідного вмісту сірки і заданого кінцевого

(цифри у лінії номограми). Видно чітка закономірність збільшення витрат магнію (відповідно і вапна) з підвищенням вихідної сірки в чавуні і зниження кінцевого її значення. Лінії функцій на діаграмі розташовані досить близько (одна від одної), що можна пояснити участю вапна в десульфурації чавуну.

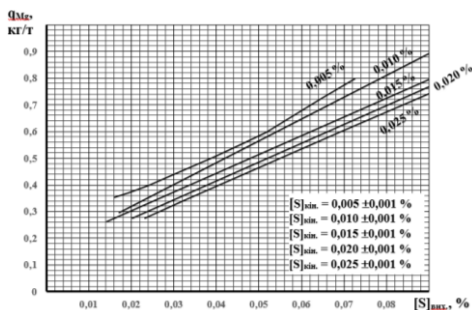


Рисунок 4 – Залежність питомої витрати (q_{Mg}) від вихідного ($[S]_{вих}$) і кінцевого (цифри на лінії) вмісту сірки в чавун при коінжекції вапна в суміші з магнієм. Маса чавуну в ковшах 220 т. (ДМКД)

Проведені нами спеціальні дослідження (на промислових ковшах) дозволили нам зробити висновок, що при вдуванні суміші магнію з вапном, оксид кальцію також бере участь в реакціях взаємодії з сіркою чавуну. Отже магній, що додається до вапна не тільки взаємодіє з сіркою, а й виконує функцію відновника, активізуючи вапно і беручи участь в реакції взаємодії CaO з сіркою чавуну. За результатами цих досліджень зроблено висновок у тому, що при вдуванні суміші CaO і Mg близько 30-40 % видаленої сірки взаємодіє з оксидом кальцію. Таким чином за цією технологією магній «працює» як десульфуратор, так і відновник.

Моноінжекція зернистого магнію (без знебіднюючих добавок).

Сучасний технологічний процес ковшової десульфурації чавуну моноінжекцією зернистого магнію за українською розробкою є новим технологічним рішенням [4], в якому ліквідовано недоробки і недоліки всіх наявних раніше технологій. Першою відмінністю є, перш за все, забезпечення виключної регульованості, стійкості і надійності дозуючої подачі в рідкий чавун. Системи дозування і вдування магнію забезпечують виключно високий парціальний тиск магнію в реакційній зоні, чим досягаються сприятливі умови для розчинення магнію в чавуні і реалізації найбільш оптимального механізму його взаємодії із сіркою чавуну. З урахуванням змінних і нестабільних вихідних умов в ковші по шлаку, передбачено вибіркове коригування складу шлаку добавкою фракціонованих матеріалів з відходів металургійного виробництва в невеликій кількості - близько 1 кг/т чавуну. Щоб не допустити попадання післяпродувочного шлаку, що утворюється, в конвертер передбачені високомеханізовані (з дистанційним управлінням) стени скачування шлаку і продувки чавуну азотом в період скачування.

Параметри технологічного процесу і компоновка установки десульфурації дозволяє забезпечити найбільшу пропускну здатність установки - аж до 4 ковшів за 1 годину. Процес моноінжекції зернистого магнію перевірений в промислових умовах на ковшах з масою чавуну від 2-3 т до 350 т. У таблиці 3 представлено показники промислового застосування технології моноінжекції зернистого магнію в ковшах з масою чавуну 100, 150 і 260 т. Фактичні показники промислових продувок свідчать про те, що моноінжекція зернистого магнію характеризується найменшими витратами реагентів - в середньому 0,42-0,55 кг/т чавуну, найменшою тривалістю операції десульфурації - в середньому 5,5-7,7 хв. і в той же час забезпеченням аж до супер глибокої десульфурації чавуну - аж до 0,0003-0,001 %, ступенем десульфурації - до 99 %, високою інтенсивністю видалення сірки - в середньому 12-14,4 %/хв., високим ступенем засвоєння реагенту - в середньому 75-92 %. Звертає на себе увагу те, що моноінжекція магнію супроводжується найменшим додатковим шлакоутворенням і відповідно втратами чавуну з цим шлаком.

На рис. 5 представлена діаграма змін питомої витрати магнію в залежності від $[S]_{\text{вих}}$ для двох інжекційних процесів - моноінжекції магнію і коінжекції магнію в суміші з флюїдизованим вапном, з якої випливає, що в разі коінжекції магнію в суміші з вапном (і всіх інших рівних умов) питома витрата магнію більше на 0,1 кг/т чавуну, ніж при моноінжекції. При цьому слід звернути увагу на те, що сумарна витрата реагенту при коінжекції суміші в 6-7 разів більше витрат магнію, так як підсумкове співвідношення магнію до вапна при процесі коінжекції становить 1:6 [9], що пов'язано з тим, що при цій технології занурення і підйом фурми з чавуну проводять з подачею вапна (для перешкодження заметалювання каналу фурми). Зіставляючи комплекс показників в таблицях 1,2 і 3 бачимо, що процес моноінжекції магнію (саме за спрощеною технологією) [4] є найбільш матеріало- енергоекономним технологічним рішенням.

Таблиця 3 - Показники технології десульфурації чавуну моноінжекцією зернистого магнію на різних підприємствах в ковшах різного типорозміру

№ п/п	Показники	Баотоський меткомбінат (КНР)	Тонхуанський меткомбінат (КНР)	Корпор. CSC, сталезавод №2 (Тайвань)
1.	Маса чавуну в ковшах, т	<u>92-103</u> 97	<u>139-156</u> 140	<u>246-273</u> 233
2.	Питомі витрати магнію, кг/т чавуну	<u>0,32-1,08</u> 0,53	<u>0,32-0,74</u> 0,55	<u>0,28-0,67</u> 0,42
3.	Тривалість вдування магнію ($\tau_{\text{ед}}$), хв.	<u>5,0-15,5</u> 7,1	<u>3,8-7,7</u> 5,5	<u>4,7-11,8</u> 7,7
	Вміст сірки в чавуні, %:	<u>0,021-0,096</u>	<u>0,015-0,050</u>	<u>0,015-0,061</u>
	- вихідний	0,041	0,030	0,029
	- кінцевий	<u>0,001-0,020</u> 0,005	<u>0,003-0,005</u> 0,002	<u>0,001-0,006</u> 0,0029

5.	Температура чавуну, °С: – вихідна	<u>1223–1363</u> 1300	<u>1287–1386</u> 1335	<u>1263–1394</u> 1327
	– після вдування	<u>1197–1357</u> 1285	<u>1275–1374</u> 1326	<u>1257–1388</u> 1319
	– Δt (різниця)	<u>0–30</u> 15	<u>2–17</u> 9	<u>4–31</u> 8
6.	Швидкість зниження температури чавуну при вдуванні зернистого магнію, °С/хв.	<u>0,1–2,0</u> 0,9	<u>0,1–0,9</u> 0,6	<u>0–1,0</u> 0,5
7.	Інтенсивність вдування магнію, кг/хв.	<u>3,5–9,0</u> 7,3	<u>10–20</u> 14,4	<u>16–16</u> 16
8.	Показник β (витрати магнію на сірку видалену), кг/кг	<u>1,05–3,45</u> 1,64	<u>1,3–3,6</u> 2,2	<u>1,1–3,5</u> 1,8
9.	Ст. D, % (ступінь десульфурзації сумарна)	<u>63–98</u> 86	<u>86–99</u> 93	<u>67–97</u> 90
10.	D (питома ступінь десульфурзації – Ст. D на 0,1 кг/т магнію), %	<u>9–27</u> 17	<u>11,8–28,1</u> 17,6	<u>14,1–29,8</u> 22,5
11.	$D_\tau = \text{Ст. D} : \tau$ (інтенсивність видалення сірки), %/хв.	<u>н.д.</u> 12	<u>11,2–23,7</u> 14,9	<u>н.д.</u> 12,8
12.	K_{Mg}^S – ступінь засвоєння магнію на сірку, %	<u>22,1–72</u> 50	<u>21–57</u> 39	<u>21,6–70,5</u> 47,4
13.	K_{Mg}^{S+Mg} – ступінь засвоєння магнію на сірку видалену і магній залишковий в чавуні, %	<u>42–99</u> 75	<u>69–99</u> 80	<u>74–99</u> 92

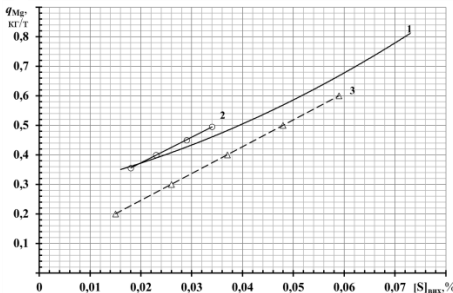


Рисунок 5 – Питомі витрати магнію (q_{Mg}) в залежності від вихідної сірки ($[S]_{\text{вих.}}$) при зниженні сірки в чавуні до 0,005 %. Маса чавуну в ковшах 220–260 т.

1 – моноінжекція магнію;
2 – коінжекція магнію в суміші з флюїдизованим вапном.

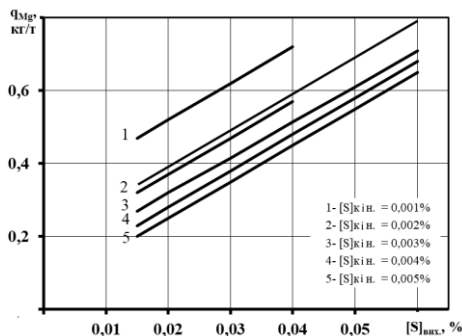


Рисунок 6 – Залежності питомої витрати магнію (q_{Mg}) від вихідного вмісту сірки ($[S]_{вих.}$) в чавуні при заданому вмісті сірки (цифри біля ліній) при моноінжекції магнію. Маса чавуну в ковші 200–350 т

Зіставлення матеріало- енергоспоживання і витрат при десульфурації чавуну 3-ма застосовуваними технологіями представлено в таблицях 4 (ковшів з масою чавуну 80-110 т) і 5 (для великовантажних ковшів). Аналіз свідчить про те, що основним базовим параметром при ковшовій десульфурації є показник питомої витрати реагенту.

Таблиця 4 - Матеріало- енергоспоживання і витрати при десульфурації чавуну різними технологіями в ковшах з масою чавуну 90–110 т. Сірка вихідна 0,040 %, після десульфурації 0,005 %

№ п/п	Показники	KR–процес (CaO+CaF ₂), Хайсин МК	Коінжекція (CaO+Mg), Хандан МК	Моноінжекція зернистого Mg, Баото МК
1.	Маса чавуну в ковшах, т	80	110	97
2.	Питомі витрати реагентів, кг/т чавуну:			
	– вапно металургійне	7,8	–	–
	– вапно флюїдизоване	–	3,3	–
	– плавиковий шпат	0,6	–	–
	– магній	–	0,55	0,49
	– корегув. шлак	–	–	1,0
	Всього реагентів, кг/т чавуну	8,4	3,85	1,49
3.	Показник β – витрати знесірчених реагентів на сірку видалену, кг/кг.	24,00	11,00	1,40
4.	Тривалість операції вдування (перемішування) реагентів, хв.	8,5	8	6,0
5.	Втрати температури чавуну за період десульфурації, °C	42	11	6
6.	Додаткове шлакоутворення в ковші, кг/т чавуну	16,8	7,6	3,0

7.	Попереднє скачування шлаку із ковша: – тривалість, хв. – втрати чавуну, кг/т чавуну	6–9 7	не потрібно –	не потрібно –
8.	Втрати чавуну з додатковим шлаком, кг/т чавуну	8,4	3,9	1,40
9.	Основні затрати на десульфуріацію чавуну, дол./т чугуна:			
	а) на реагент	1,32	3,14	1,77
	б) на втрати чавуну з попередньо скачуваним шлаком	1,75	–	–
	в) на втрати чавуну з шлаком, що утворюється додатково	2,10	0,94	0,35
	г) на компенсацію втрат температури чавуну	0,84	0,22	0,12
	д) на змінні фурми і	0,09	0,12	0,12
	е) на скачування шлаку і його перевезення	0,80	0,53	0,26
	ж) витрати по переділу	0,30	0,42	0,20
	Всього витрат на десульфуріацію, дол./т чавуну	7,20	5,42	2,92
10.	Перевищення витрат в порівнянні з моноінжекцією магнію, дол./т чавуну	4,28	2,5	0
11.	Співвідношення витрат	2,47	1,86	1

Примітка. В розрахунках прийняті ціни матеріалів на світовому ринку станом на лютий 2020 р.

Таблиця 5 - Матеріало– енергоспоживання і витрати при десульфуріації чавуну різними процесами в ковшах з масою чавуну 220–260 т

№№ п/п	Показники	KR– процес (CaO+F ₂). Корп. CSC (Тайвань)	Коінжекція (CaO+Mg), ДМКД (Україна)	Моноінжекція Mg, Корп. CSC (Тайвань)
1.	Маса чавуну в ковшах, т	260	225	260
2.	Питомі витрати реагентів, кг/т чавуну:			
	– вапно металургійне	9,5	–	–
	– вапно порошок молоте	2,0	–	–
	– вапно молоте флюїдизоване	3,12	–	–
	– плавиковий шпат	0,5	–	–
	– магній зернистий	–	0,52	0,43
	– відходи CaO _{вмісні}	–	–	1,0
	Всього реагентів	12,0	3,64	1,43

3.	Показник β – витрати реагентів на сірку видалену, кг/кг.	34,3	10,4	1,25
4.	Тривалість операції вдування реагентів (або перемішування), хв.	12,0	12,5	6,5
5.	Втрати температури чавуну за період десульфурації, °С	42	12	8
	Додаткове шлакоутворення в ковші, кг/т чавуну	24,0	7,28	3,8
7.	Втрати чавуну, кг/т чавуну: – з шлаком, що попередньо скачується	7	–	–
	– з додатково утворюваним шлаком	12,0	3,62	1,43
8.	Основні витрати на десульфурації чавуну, дол./т чавуну:			
	а) на знесірчені реагенти	1,95	3,44	1,51
	б) на втрати чавуну з шлаком, що попередньо скачується	1,75	–	–
	в) на втрати чавуну зі шлаком, що утворюється додатково	3,00	0,91	0,35
	г) на компенсацію втрат температури чавуну	0,84	0,24	0,16
	д) на вогнетривкі фурми	0,09	0,12	0,12
	е) на скачування шлаку (після десульфурації) і його перевезення	0,70	0,52	0,35
ж) витрати на переділ	0,30	0,42	0,20	
	Всього витрат на десульфурацію, дол./т чавуну	8,63	5,65	2,75
9.	Перевищення витрат в порівнянні з моноінжекцією магнію, дол./т чавуну	5,88	2,90	–
10.	Співвідношення витрат	3,14	2,05	1

Зі збільшенням цього параметра (питома витрата реагенту) зростає шлакоутворення в ковші, тривалість процесу власне десульфурації, а також теплові втрати знесірованого чавуну. Зазначене супроводжується

збільшенням витрат на реагенти, на втрати чавуну з ковшовим шлаком і на компенсацію втрат температури чавуну.

У підсумку виходить, що KR-процес (застосовує найбільш дешеві реагенти) має найбільші витрати, а моноінжекція зернистого магнію (застосовує досить дорогий реагент) завдяки високому ступеню його засвоєння витрачає найменшу його кількість, в результаті виходить найдешевшим і маловитратним способом десульфурзації.

Викладене відноситься до варіанту моноінжекції зернистого магнію і не включає практику моноінжекції магнію за технічними рішеннями Пекінського інституту металургійного обладнання, так як останній варіант реалізує нерациональний механізм і несприятливі умови введення магнію в чавун і його взаємодії із сіркою чавуну.

Слід також звернути увагу, що KR-метод (на відміну від інжекційних) має досить тривалий цикл обробки - 40 хв. і більш, що не дозволяє вписати його в цикл роботи конвертера. З цих причин на кожен конвертер необхідно більше одного KR-стенду.

Підводячи підсумок результатів досліджень і аналізу, необхідно зробити висновок, що моноінжекція зернистого магнію є пріоритетним і найбільш економічним процесом позапічної десульфурзації чавуну. Витрати на його реалізацію менш на 2,50-5,88 долара на кожній 1 т обробленого чавуну. Крім цього капітальні витрати на установку десульфурзації моноінжекцією магнію в 1,3-2,0 рази менш, ніж за іншими технологіями.

Висновки. При аналізі економіки виплавки чавуну і сталі, а також вибору процесу позапічної десульфурзації чавуну необхідний всебічний і комплексний підхід в оцінці аналізованих процесів. Саме такий підхід дозволив встановити, що застосування KR-процесу ($\text{CaO} + \text{CaF}_2$), що використовує найбільш дешеві і недефіцитні матеріали, супроводжується найбільшими капітальними і експлуатаційними витратами.

Фактичні дані промислового застосування різних процесів ковшової десульфурзації чавуну (KR-процесу, коінжекції вапна і магнію, моноінжекції зернистого магнію) найбільш витратним - 7,2-8,6 дол./т чавуну є KR-процес.

Найменш витратним - 2,7-2,9 дол./тон чавуну, є процес моноінжекції зернистого магнію (із забезпеченням сприятливих умов насичення магнієм прифурменої зони).

Інжекційні процеси десульфурзації чавуну мають найменшу тривалість процесу рафінування і вписуються в цикл конвертерної плавки, забезпечуючи зниження сірки в чавуні аж до $\leq 0,001\%$ сірки.

Перелік посилань

1. Шевченко А.Ф., Большаков В.И Башмаков А.М. Технология и оборудование десульфурации чугуна магнием в большегрузных ковшах. - К.: Наукова думка. 2011. - 207 с.
2. УШ Международный симпозиум по Десульфурации чугуна и стали // Сб. докладов. Нижний Тагил, 2004 г.). – Нижний Тагил, 2004. – 87.
3. Инь Жуй Ю. Отечественное сталеплавильное производство - обзор состояния и развитие технологий до 2010 г. // Сб. науч. тр. всекитайской конф. "Выплавка и непрерывная разливка стали". — Ханчжоу, КНР, 2008. - С. 1-13.
4. Шевченко А.Ф. Внепечная десульфурация чугуна в ковшах. Технология. Исследование. Анализ. Совершенствование. [А.Ф. Шевченко, И.А. Маначин, А.С. Вергун и др.]–Днепропетровск. «Дніпро –VAI». 1917. – 252 с.
5. *Технология* производства трубной ультранизкосернистой стали / А.Н. Ушаков, В.А. Бигеев, А. Столяров, М.В. Потапова // *Черные металлы* - Москва, РФ - 2019 - № 12 - С. 26-31.
6. *Manufacture of Low-Sulfur Pipe Steel with Ladle Desulfurization of Cast Iron* / S.N. Ushakov, V.A. Avramenko, V.A. Bigeev, A.M. Stolyarov & M.V. Potapova // *Metallurgist* , Springer (USA) - 2018 - Volume 61 –P.967-970. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0593-2>
7. Ушаков С.Н. Производство трубной низкосернистой стали с ковшевой десульфурацией чугуна. [С.Н. Ушаков, В.Л. Авраменко, В.А. Бичеев, А.М. Столяров, М.В. Потапова]– М.: Металлург. – 2017. - № 11. - С. 47-61.
8. Зборщик А.М. Эффективность использования реагентов в современных процессах внедоменной десульфурации чугуна. [А.М. Зборщик, С.В. Куберский, Н.В. Косолап и др.]– Бюл. "Черная металлургия". М. -2011. - № 12. - С. 35-41.
9. Зборщик А.М. Эффективность использования флюидизированной извести для десульфурации чугуна в 300- тонных заливных ковшах. [А.М. Зборщик, С.В. Куберский,, Г.Я.Довгалюк и др.]– Сталь. – М. – 2011. – № 9. – С. 16-19.

References

1. Shevchenko A.F., Bol'shakov V.I Bashmakov A.M. Tekhnologiya i oborudovanie desul'furacii chuguna magniem v bol'shegruznyh kovshah. - K.: Naukova dumka. 2011. - 207 s.
2. USH Mezhdunarodnyj simpozium po Desul'furacii chuguna i stali // Sb. dokladov. Nizhnij Tagil, 2004 g.). – Nizhnij Tagil, 2004. – 87.
3. In' ZHuj YU. Otechestvennoe staleplavil'noe proizvodstvo - obzor sostoyaniya i razvitie tekhnologij do 2010 g. // Sb. nauch. tr. vsekitsajskoj konf. "Vyplavka i nepreryvnaya razlivka stali". — Hanchzhou, KNR, 2008. - S. 1-13.
4. Shevchenko A.F., Manachin I.A., Vergun A.S. i dr. Vnepechnaya desul'furaciya chuguna v kovshah. Tekhnologiya. Issledovaniya. Analiz. Sovershenstvovanie. Dnepropetrovsk. «Dnipro –VAI». 1917. – 252 s.
5. Tekhnologiya proizvodstva trubnoj ul'tranizkosernistoj stali / A.N. Ushakov, V.A. Bigeev, A. Stolyarov, M.V. Potapova // *CHernye metally* - Moskva, RF - 2019 - № 12 - S. 26-31.
6. *Manufacture of Low-Sulfur Pipe Steel with Ladle Desulfurization of Cast Iron* / S.N. Ushakov, V.A. Avramenko, V.A. Bigeev, A.M. Stolyarov & M.V. Potapova //

Metallurgist , Springer (USA) - 2018 - Volume 61 –P.967-970.
<https://doi.org/10.1007/s11015-018-0593-2>

7. Ushakov S.N., Avramenko V.L., Bichev V.A., Stolyarov A.M., Potapova M.V. Proizvodstvo trubnoj nizkosernejstoj stali s kovshevoj desul'furaciej chuguna. M.: Metallurg. – 2017. - № 11. - S. 47-61.
8. Zborshchik A.M., Kuberskij S.V., Kosolap N.V. i dr. Effektivnost' ispol'zovaniya reagentov v sovremennyh processah vnedomennoj desul'furacii chuguna. Byul. "CHernaya metallurgiya". M. - 2011. - № 12. - S. 35-41.
9. Zborshchik A.M., Kuberskij S.V., Dovgalyuk G.YA. i dr. Effektivnost' ispol'zovaniya flyuidizirovannoj izvesti dlya desul'furacii chuguna v 300- tonnyh zalivochnyh kovshah. - Stal'. - M. - 2011. - № 9. - S. 16-19.

Shevchenko A.P., Dr. Sci. (Engin.), Professor, Leading Researcher, ORCID 0000-0003-0867-6825

Manachyn I.A., PhD (Engin.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-9795-6751

Dvoskin B.W., PhD (Engin.), Senior Researcher, ORCID 0000-0003-2891-7833;

Kislyakov V.G., PhD (Engin.), Senior Researcher ORCID 0000-0002-1775-5050

Vergun A.S., Dr. Sci., (Engin.), Senior Research Scientist, ORCID 0000-0001- 5493-9214

Shevchenko S.A., Ph.D., Senior Researcher, ORCID 0000-0002-9287-9177

Petrusha V.P., Lead Engineer ORCID 0000-0002-1031-3241

Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

Bashmakov A.M., PhD (Engin.), Technical director PE «ECOTEHSERVIS»

Calculation and analytical evaluation and industrial verification of the indicators of ladle desulfuration of cast iron using different reagents

Summary. The necessity of an integrated approach in assessing and choosing a technology for secondary desulfurization of cast iron has been substantiated. It is shown that one of the main parameters and indicators is the consumption of the reagent, which determines all the main indicators of the process. A comparative analysis of the indicators in Table 1 also indicates that in the KR process, an increase in the mass of pig iron in the ladle reduces the desulfurization efficiency, since the transition from a ladle with a mass of 80 and 100 tons of pig iron to large ladles (260 tons) is accompanied by a decrease in the specific degree of desulfurization, removal increases the consumption of the reagent per unit of sulfur removed. Significant specific consumption of reagents (up to 8-17 kg / t of cast iron) and the duration of mixing (up to 8-20 minutes), as well as the cycle - up to 25-68 minutes, which causes tangible losses in the temperature of the cast iron - on average 40-42 ° C, and in a number of desulfurization modes - up to 92-128 ° C. This is due to the fact that with an increase in the mass of cast iron, the mass transfer processes between the slag and the molten iron of the ladle deteriorate. The highest specific consumption of reagents in the KR-process ultimately determined the highest costs in the implementation of this process. The lowest specific costs for monoinjection of magnesium predetermine the lowest costs for the industrial development of this process. Actual indicators of industrial blowdowns indicate ohm. that monoinjection of granular magnesium is characterized by the lowest consumption of reagents - on average 0.42-0.55 kg / t of cast iron, the shortest duration of the desulfurization operation - on average 5.5-7.7 minutes and at the same time providing up to super deep desulfurization of cast iron - up to 0.0003–0.001%, desulfurization degree

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. – 2020. - Вип.34

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2020. – Collection 34

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2020. – Vypusk 34

- up to 99%, high sulfur removal rate - on average 12–14.4% / min, high reagent assimilation rate - on average 75–92%. The actual data on the technology applied KR-processes (CaO + CaF₂), co-injection of lime with magnesium (CaO + Mg) and monoinjection of granular magnesium according to the Ukrainian injection technology are presented. The costs of desulfurization by KR processes - koninjection - monoinjection are in the ratio 3: 2: 1. The advantage of injection processes of cast iron desulfurization has been substantiated.

Keywords: out-of-furnace desulfurization of cast iron, powdered lime, granular magnesium, tuyeres, desulfurization efficiency

For citation: *Shevchenko A.F., Manachin I.A., Dvoskin B V., Kislyakov V.G., Bashmakov A.M., Vergun A S., Shevchenko S.A., Petrusha V.P.* Raschetno-analiticheskaya otsenka i promyshlennaya proverka pokazateley kovshevoy desulfuratsii chuguna s primeneniym razlichnykh reagentov. [Calculation and analytical evaluation and industrial verification of the indicators of ladle desulfurization of cast iron using various reagents.]. «*Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii*». [*Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy.*] 2020, 34. 73-89. (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2020-34-73-89

*Стаття надійшла до редакції збірника 14.10.2020 року,
пройшла внутрішнє і зовнішнє рецензування.
(Протокол засідання редакційної колегії №3 від 22 грудня 2020 р.)*