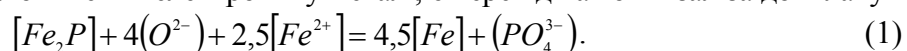


СІГАРЬОВ Є.М., д.т.н., професор
 ЧЕРНЯТЕВИЧ А.Г., д.т.н., професор
 ГУРЖИЙ Д.О., аспірант
 ЧУБІНА О.А., к.т.н., доцент

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

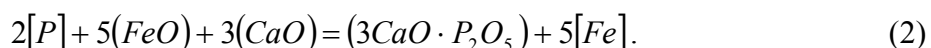
КОНЦЕПЦІЯ ПЕРЕХОДУ ДО МАЛОШЛАКОВОЇ КОНВЕРТЕРНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ (ПОВІДОМЛЕННЯ 2)

Вступ. Процес видалення фосфору можна описати як перехід останнього до шлаку за рахунок зв'язування його атомів з киснем. Компенсуючим процесом, що ліквідує безперервне накопичення електронів у металі, є перехід катіонів заліза до шлаку



Тому для здійснення реакції (1) необхідно мати в шлаку іони O^{2-} та Fe^{2+} .

Прийнято вважати [1], що найбільш значний вплив на дефосфорацію виявляють оксиди заліза шлаку як джерело кисню і оксиди кальцію, що володіють найбільшою здатністю до офлюсування оксиду фосфору. Випереджальне видалення фосфору в порівнянні з вуглецем у цих умовах досягається тільки при швидкому наведенні високоосновного рідкорухомого окисленого шлаку, на границі якого з металом розвивається реакція дефосфорації



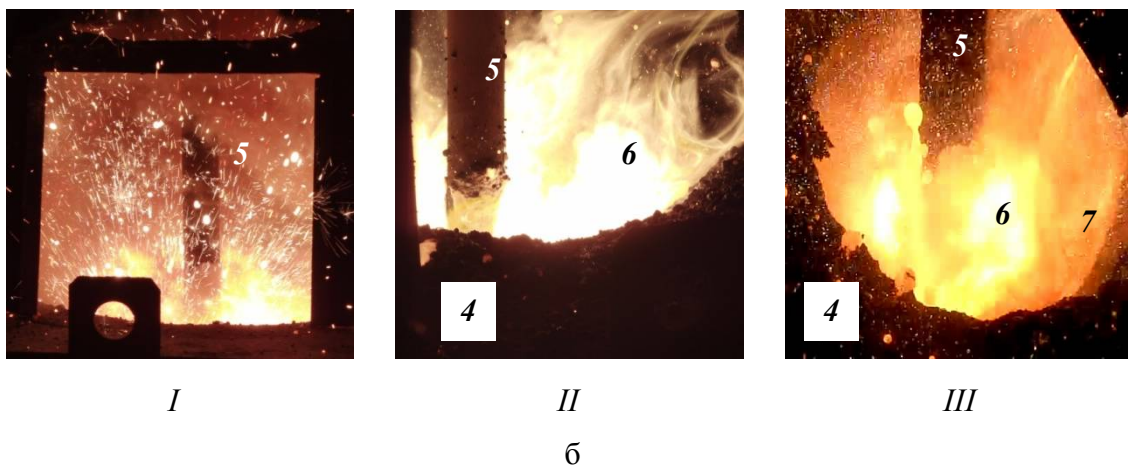
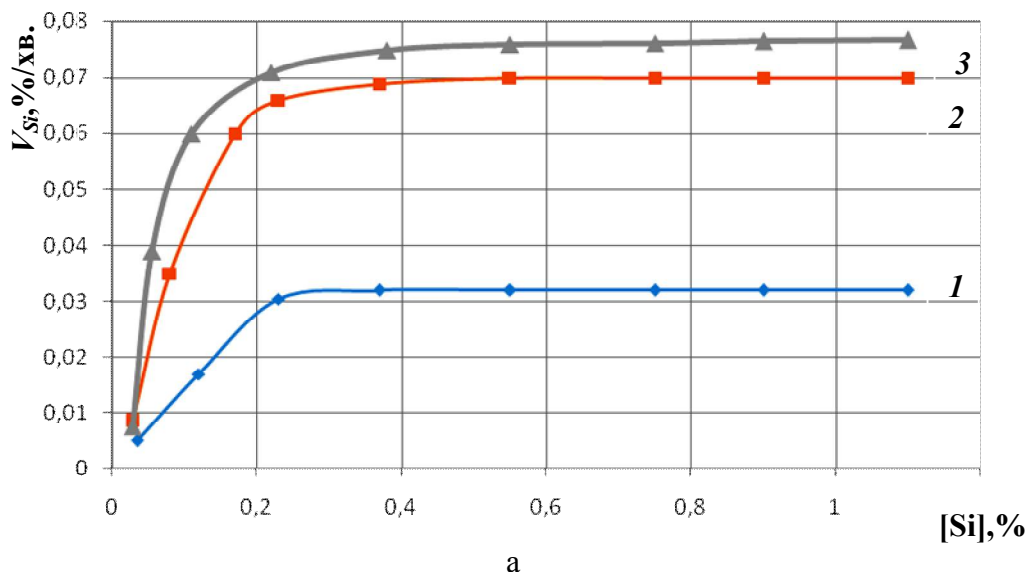
Для інтенсифікації реакції дефосфорації необхідно сприяти ранньому утворенню $[CaO \cdot Fe(Mn)_xO]_p$ з високою концентрацією Fe_xO , що досягається на практиці попереднім знекремнюванням до 0,15% Si чавуну і подачею в кисневому або азотнокисневому струмені сумішей на основі вапна, залізної руди, прокатної окалини з добавками розріджувачів із одночасним вдуванням кисню через додаткову верхню фурму на поверхню ванни. Для досягнення високої ефективності дефосфорації основність шлаку зазвичай підтримують на рівні 5,0, що забезпечує отримання найбільш високих значень відношення $(P)/[P]$ [1].

Постановка задачі. З метою уточнення особливостей та закономірностей видалення фосфору з переробного чавуну в умовах інжекції реагентів вглиб розплаву у ковші через заглибну фурму, доцільності використання верхньої кисневої фурми для регулювання вмісту (Fe_xO) у шлаку на поверхні ванни, впливу основності шлаку на хід та результати рафінування проведено серію високотемпературних досліджень [2].

Результати роботи. Динаміка та характерна картина знекремнювання попередньо рафінованого за сіркою [3] переробного чавуну при вдуванні газоподібного кисню через заглибні стаціонарну або обертову фурми типу «труба в трубі» [4] представлено на рис.1. Встановлено, що зменшення вмісту кремнію в чавуні з 1,20% до 0,010% забезпечується у ході 25...12-ти хвилинної обробки розплаву з відповідним підвищенням інтенсивності вдування кисню з 0,60 до 1,010 м³/т·хв. та швидкості обертання фурми (при сталій інтенсивності вдування кисню). Одночасно відбувається видалення частки вуглецю до 0,4% і марганцю до 0,2%.

Підвищення інтенсивності вдування кисню призводить до закономірного спінювання в'язкого кислого шлаку (72,0...78,3% SiO_2 , 4,2...6,8% FeO , 3,8...5,4% MnO). Газоподібні продукти окислення вуглецю чавуну прориваються крізь шар шлаку на по-

верхню ванни у формі своєрідних «свищів» (рис.1, б), які без певної закономірності для стаціонарної та відносно впорядковано для обертової фурми змінюють своє положення відносно стовбура фурми. При використанні обертової фурми спостерігається розосередження виходу «свищів» по периферії ванни.



витрата O_2 : стаціонарна фурма: I – 0,6 м³/т·хв.; 2 – 1,01 м³/т·хв.;
 обертова фурма: 3 – 1,01 м³/т·хв.;
 I – на початковому етапі обробки чавуну; II – у основний період обробки;
 III – наприкінці обробки

4 – ківш; 5 – заглибна фурма; 6 – вихід газів на поверхню ванни; 7 – шлак

Рисунок 1 – Залежність швидкості знекремнювання чавуну (V_{Si}) від вмісту кремнію при витратах кисню (а) та характерна картина розвитку процесу знекремнювання (б)

Підтверджено, що швидкість видалення кремнію при вмісті $[Si] > 0,2\%$ не залежить від концентрації кремнію і визначається (рис.1, а) тільки витратою кисню, тобто швидкість реакції десиліконізації лімітується поставкою (масоперенесенням) кисню до місця реакції.

Як показали результати лабораторних експериментів зі знекремнювання низькомарганцевого чавуну, особливу увагу необхідно приділяти елементам технології, що сприяють формуванню рідкорухомого шлаку із запобіганням викидів останнього з ковшу.

До елементів технології, що запобігають викиданню розплаву, як встановлено у ході досліджень, відноситься знекремнювання чавуну продуванням через обертову фурму кисневими струменями, що несуть у зваженому стані суміш вапняку з содою у співвідношенні 58...62% $CaCO_3$ + 38...42% Na_2CO_3 . Сода у такому випадку виконує роль як додаткового окислювача домішок чавуну, так і розріджувача покривного шлаку. Так, у разі формування в ході обробки рідкорухомого шлаку, що містив 32,5...47,9% CaO , 38,7...53,1% SiO_2 , 6,7...12,4% Al_2O_3 , 0,15...0,23% MnO , 4,3...5,8% FeO , рафінування чавуну по кремнію не викликало ускладнень.

Для зменшення тривалості операції видалення кремнію з чавуну та кількості кисню, що йде на реакцію, перш за все, з вуглецем чавуну, витрату кисню на продування розплаву необхідно збільшити при вмісті кремнію $Si > 0,2\%$ і зменшити при $Si < 0,2\%$. У випадку використання обертової заглибної фури швидкість її обертання у вказані вище періоди доцільно підтримувати для досліджених умов у межах 70-75 об/хв. та 110-120 об/хв. відповідно.

Після скачування шлаку з поверхні ванни проводили операцію видалення фосфору з попередньо десульфурованого та знекремненого чавуну на лабораторному стенді [2]. У якості порошкоподібних дефосфаторів використовували суміші різних типів (табл.1).

Таблиця 1 – Склад сумішей для дефосфорації чавуну

| Компонент суміші | Склад порошкоподібних сумішей, % | | |
|---|----------------------------------|------------|-----------|
| | «А» | «Б» | «В» |
| Конвертерний шлак | 80...85 | - | - |
| Вапно | - | 25...50 | - |
| CaF_2 | 15...20 | - | - |
| Вапняк | - | - | 60...80 |
| Содовмісні відходи (90-95% Na_2CO_3) | - | 50...75 | 20...40 |
| Питома витрата, кг/(тхв.) | 0,29...0,34 | 1,05...4,0 | 2,1...4,6 |

Усі суміші (табл.1) забезпечили видалення фосфору з розплаву, але з різною ефективністю. У цілому, за результатами випробування режимів комплексної обробки чавуну показники десульфурації, знекремнювання та дефосфорації розплаву (із використанням сумішей «А», «Б» та «В») коливаються в межах 78,3...87,5%, 61,7...78,9%, 45,6...50,0% відповідно. Необхідно відмітити, що використання суміші «А» (табл.1) забезпечило найкращі результати дефосфорації чавуну.

Так, наприклад, вдування вглиб попередньо десульфурованого та знекремненого розплаву чавуну порошкоподібного конвертерного шлаку у суміші із CaF_2 (суміш «А») на протязі 18,2...18,6 хв. супроводжувалося зниженням концентрації фосфору до 0,025...0,027% (табл.2). Після проведення процесу дефосфорації шлак містив: 17,5...21,2% CaO , 28,9...35,6% SiO_2 , 4,2...5,0% Al_2O_3 , 21,5...27,5% FeO , 2,7...3,5% Fe_2O_3 , 1,8...2,5% MnO , 1,9...2,5% P_2O_5 . В той же час, необхідно враховувати, що використання кінцевого конвертерного шлаку із підвищеним вмістом (P_2O_5) у відповідних умовах може призвести до рефосфорації.

Таблиця 2 – Результати експериментів за технологічним режимом комплексної обробки чавуну із використанням суміші «А» (табл.1)

| №№ експ. | Тривалість обробки, хв. | | Витрата реагентів для послідовного видалення $S/Si, P$ | | | | Вміст у чавуні, % до / після видалення S/P | | | | | $T_{\text{чав}}$, до / після °С | ΔS , % | ΔSi , % | ΔP , % |
|------------------|-------------------------|---------|--|-------------|----------------------------|----------------------------|--|-------------|-------------|---------------|---------------|----------------------------------|----------------|-----------------|----------------|
| | S | Si, P | Суміш «А», кг/т | Mg , кг/т | O_2 , нм ³ /т | N_2 , нм ³ /т | C | Si | Mn | S | P | | | | |
| 29 | 12,8 | 19,8 | - / 6,15 | 0,90 / - | - / 9,90 | 0,76 / 1,38 | 4,28 / 4,11 | 0,56 / 0,18 | 0,19 / 0,15 | 0,037 / 0,008 | 0,051 / 0,027 | 1325 / 1295 | 78,3 | 67,8 | 47,0 |
| 32 | 12,4 | 19,4 | - / 6,02 | 0,85 / - | - / 9,23 | 0,74 / 1,35 | 4,35 / 4,12 | 0,60 / 0,15 | 0,24 / 0,19 | 0,040 / 0,007 | 0,045 / 0,025 | 1330 / 1285 | 82,5 | 75,0 | 44,4 |
| 34 | 13,1 | 20,1 | - / 6,24 | 0,92 / - | - / 9,76 | 0,78 / 1,42 | 4,23 / 4,05 | 0,58 / 0,16 | 0,22 / 0,19 | 0,040 / 0,006 | 0,050 / 0,025 | 1320 / 1300 | 85,0 | 72,4 | 50,0 |
| Середнє значення | 12,8 | 19,8 | - / 6,13 | 0,89 / - | - / 9,63 | 0,76 / 1,38 | 4,28 / 4,09 | 0,58 / 0,16 | 0,22 / 0,18 | 0,039 / 0,007 | 0,048 / 0,026 | 1325 / 1293 | 81,9 | 71,7 | 47,1 |

У ході досліджень було також встановлено, що у якості дефосфораторів раціонально обирати добавки, що забезпечують основність шлаку після обробки чавуну на рівні 0,8...2,0 та загальний вміст залізу в ньому на рівні 40%. При перевищенні граничного значення 4,0 основність шлаку починає негативно впливати на показники рафінування.

Можливо, цей ефект обумовлений тим, що при дуже високій основності шлаку оксидів заліза виявляється недостатньо для розрідження вапна, що утворюється при дисоціації вапняку (суміш «В»). При цьому в'язкість шлаків підвищується, і умови його перемішування з розплавом погіршуються.

Підтверджено, що найбільший вплив на кінетичні показники дефосфорації має температура ванни. Із підвищенням температури розплаву по ходу рафінування вище визначеної межі та недостатній кількості стабілізаторів у покривному шлаку пентаоксид фосфору нестабільний та здатен відновлюватися до фосфору під впливом відновлювачів у рідкому чавуні. Найкращі результати досягаються при температурах нижчих, ніж 1400⁰С.

Підтверджено також, що реакція дефосфорації йде не за рахунок взаємодії із киснем, що вдувається, а з оксидом заліза в шлаку і CaO , тому режим з підвищеним змістом оксиду заліза у шлаку дає переваги. В той же час, також визначено, що ефективність реакції дефосфорації має тенденцію до зменшення після максимуму в районі 23...25% (FeO). При цьому із зростанням температури цей максимум зміщується до менших значень.

Встановлено, що у досліджених умовах для забезпечення дефосфорації достатньо мати рівень окисленості шлаку на рівні 18...20%. З аналізу результатів експериментів можна зробити висновок, що вже при основності шлаків на рівні 1,4...1,7 коефіцієнт розподілу фосфору має величину порядку 10².

За результатами досліджень виконано обґрунтування промислового варіанта комплексної технології ковшової послідовної десульфурзації, знекремнювання та дефосфорації чавуну, у тому числі з врахуванням можливості використання переваг обертової заглибної фурми та проведення всіх операцій у одному великовантажному ковші.

Вихідні умови, прийняті при розробці промислового варіанта:

- знекремнювання та дефосфорація чавуну проводиться у 230-т заливальному ковші з використанням модернізованої установки ковшового рафінування (рис.2);

- заповнення ковша розплавом передільного чавуну на 300...400 мм нижче від рівня зливного носка;
- тривалість обробки одного ковша не повинна перевищувати 20...30 хв.;
- рафінуванню піддається передільний чавун, що містить, %: 0,70...1,20 *Si*; 0,020...0,060 *Mn*; 0,040...0,080 *P*; 0,003...0,005 *S*;
- температура чавуну перед обробкою 1260...1320⁰С;
- заданий кінцевий вміст фосфору у рафінованому чавуні 0,015...0,025%;
- зниження температури чавуну у процесі обробки не більш, ніж на 50⁰С.

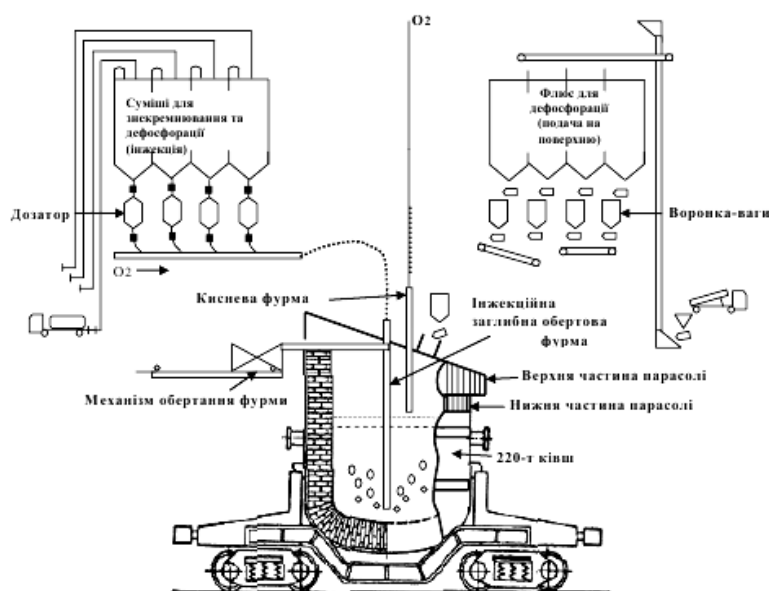


Рисунок 2 – Схема установки для комплексного рафінування передільного чавуну для послідовного видалення сірки, кремнію та фосфору

об/хв.) вглиб розплаву кисню. Передбачається основність шлаку (B_{κ}), який формується у ковші на рівні не вище 1,2...1,4, за якої шлак набуває схильності до інтенсивного спінювання.

2. У другому періоді після скачування з поверхні розплаву кислого шлаку, що утворився під час знекремнювання, проводиться дефосфорація чавуну:

- за варіантом 1 (табл.3): шляхом присадження на поверхню ванни кускових шлакоутворюючих матеріалів (CaO, CaF_2) та окислювачів (агломерат) з одночасним вдуванням вглиб розплаву порошкоподібного флюсу ($CaO +$ залізорудний концентрат) та продувкою зверху через водоохолоджувану фурму технологічним киснем.

Таблиця 3 – Рекомендовані витрати твердих та газоподібних реагентів для дефосфорації передільного чавуну у ковші за варіантом 1

| Маса чавуну, т | Витрата газоподібного кисню | | Витрата залізорудного концентрату | | Витрата вапна | | Витрата CaF_2 | |
|----------------|-----------------------------|--------------------|-----------------------------------|------|---------------|------|-----------------|------|
| | нм ³ | нм ³ /т | кг | кг/т | кг | кг/т | кг | кг/т |
| 50 | 458 | 9,16 | 1664 | 33,3 | 1616 | 32,3 | 183 | 3,66 |
| 100 | 821 | 8,21 | 2984 | 29,8 | 2101 | 21,0 | 327 | 3,27 |
| 200 | 1469 | 7,35 | 5341 | 26,7 | 2730 | 13,7 | 585 | 2,93 |

Розрахунок витрат реагентів для дефосфорації чавуну проведено з врахуванням необхідності забезпечення концентрації кремнію у чавуні перед початком дефосфорації на рівні 0,10...0,15%. Враховано також видалення, у середньому, 0,010% *Mn*, 0,005% *P* та 0,2% *C* у ході знекремнювання.

Рекомендовано наступний порядок проведення комплексного рафінування чавуну:

1. У першому періоді проводять попереднє знекремнювання чавуну (до 0,10...0,15% *Si*) шляхом вдування через стаціонарну або обертову заглибну фурму (90...120

- за варіантом 2 (табл.4): шляхом вдування вглиб розплаву через заглибну фурму порошкоподібної суміші вапняку та содовмісних відходів із одночасною продувкою зверху через водоохолоджувану фурму технологічним киснем. Передбачається формування основного ($CaO/SiO_2 = 3,3...3,7$) окисленого (16...20% FeO) шлаку, який має високу поглинаючу схильність по відношенню до фосфору.

Таблиця 4 – Рекомендовані витрати твердих та газоподібних реагентів для дефосфорації передельного чавуну у ковші за варіантом 2

| Маса чавуну, т | Витрата газоподібного кисню | | Витрата вапняку | | Витрата содовмісних відходів | |
|----------------|-----------------------------|--------------------|-----------------|------|------------------------------|------|
| | нм ³ | нм ³ /т | кг | кг/т | кг | кг/т |
| 50 | 1125 | 22,5 | 2876 | 57,5 | 719 | 14,3 |
| 100 | 2142 | 21,4 | 3740 | 37,4 | 935 | 9,4 |
| 200 | 3855 | 19,2 | 4859 | 24,3 | 1214 | 6,1 |

З практики відомо, що при обробці чавуну в ковшах відкритого типу оголення поверхні ванни при вдуванні в нього порошкоподібних сумішей та викликане цим барботування ванни істотно збільшує втрати тепла. Зменшення тепловтрат в процесі обробки чавуну забезпечує використання ізольованої кришки (парасолі) (рис.2), яка одночасно захищає футеровку ковша від контакту з активним шлаком за рахунок її спеціальної конструкції. В конструкції установки передбачено зону для відбирання проб і вимірювання температури, механізми підйому та обертання заглибної газопорошкової фурми і переміщення зонду, фурму для вдування кисню на поверхню ванни та парасолі для уловлювання пилу з газів, що відходять.

Висновки. Запропоновано новий напрямок в реалізації ресурсо- та енергоефективної комплексної технології ковшової обробки переробного чавуну з видаленням сірки, кремнію та фосфору перед конвертерною плавкою. Отримано нові експериментальні дані щодо закономірностей видалення фосфору з переробного чавуну із використанням інжекції порошкоподібних сумішей реагентів різного складу.

Зменшення тривалості ковшового рафінування переробного чавуну за запропонованою технологією і підвищення температури розплаву перед заливанням у кисневий конвертер сприяє покращенню теплового балансу конвертерної плавки та забезпечує можливість використання добавок марганцевмісної сировини.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дефосфорация и десульфурация при предварительной обработке чугуна / Ш.Кавасаки, М.Аоки, А.Камимори [и др.] // Инжекционная металлургия' 86: IV Междунар. конф., 11-13 июня 1986 г.: Труды. – М.: Металлургия, 1990. – С.220–229.
2. Концепція переходу до малошлакової конвертерної технології (повідомлення 1) / Є.М.Сігарьов, А.Г.Чернятевич, Д.О.Гуржий, О.А.Чубіна // Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету: (технічні науки). – Кам'янське: ДДТУ. – Вип. 2(31). – 2017. – С.3-9.
3. Сігарьов Є.М. Енергоефективність інтенсифікації ківшової десульфуратії чавуну / Є.М.Сігарьов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – №2/1(74). – С.38-42.
4. Chernyatevich A.G. Hot metal refining in the ladle with simultaneous removal of silicon and sulfur / Chernyatevich A.G., Sigarev E.N., Chernyatevich I.V. // Advances in Metallurgical Processes and Materials: 2nd International Conference, 4-5 June 2015 y.: Materials. – Kiev, 2015. – P.24-27.

Надійшла до редколегії 22.01.2018.