

УДК 669.18.046.554: 621.74.047

<https://doi.org/10.34185/tpm.6.2018.06>

Камкін В.Ю., Токарев С.І., Мішалкін А.П., Анкудінов Р.В., Безшкуненко О.Г.

СПІНЮВАННЯ ШЛАКУ В ДСП ЯК ЕФЕКТ ЗАСТОСУВАННЯ ШЛАКОУТВОРЮЮЧИХ СУМІШЕЙ З РЕГУЛЬОВАНИМ СПІВВІДНОШЕННЯМ КОМПОНЕНТІВ ПРИ ВДУВАННІ У ВАННУ В СТРУМЕНЯХ ГАЗУ

Kamkin V., Tokarev S., Mishalkin A., Ankudinov R., Bezshkurenko O.

SPLING OF SLOTS IN CHAFF AS AN EFFECT OF USING MIXTURES WITH A REGULATED COMPOSITE RELATED BASIS IN THE BATHROOM IN GAS STRUCTURES

Вибір раціонального режиму шлакоутворення в кисневих конвертерах і ДСП ґрунтується на дослідженні впливу хімічного і компонентного складу на фізико-хімічні властивості шлаку, що визначають його рафінувальну здатність. Наведено фізико-хімічне обґрунтування раціонального компонентного та хімічного складу флюсів для утворення шлакової фази з заданими фізико-хімічними властивостями при виплавці електросталі. Показано, що при зниженні інтенсивності окислювання вуглецю металевого розплаву та в умовах позапічної обробки для утворення стійкої за часом існування газо-шлакової піни, застосовувати комплексні шлакоутворюючі суміші, які містять природні мінерали та техногенні відходи на основі вуглецю та оксидів заліза. Підвищення ефективності застосування шлакоутворюючих сумішей з регульованим співвідношенням $\text{CaO} : \text{CaCO}_3 : \text{C} : \text{Fe}_x\text{O}_y$, досягається за рахунок реалізації способу введення дисперсного матеріалу в потоці газу-носія з регульованим, в залежності від вмісту в металі вуглецю, окислювальним потенціалом. Встановлено, що найбільш раціональним для умов киснево-конвертерної плавки є застосування матеріалів цільового призначення, які містять вапно з недопалом 15 - 20%. Матеріал подається у ванну в кінці окислювального періоду при зниженні вмісту вуглецю до 0,15 - 0,2% при значному підвищенні температури рідкої сталі. Для умов виплавки сталі в ДСП недопал може становити 40 - 60%.

The purpose of the work is to select a rational mode of slag formation in oxygen converters and chipboard. It should be based on the study of the influence of the chemical and component composition on the physical and chemical properties of slag, which determine its refining capacity. The physicochemical substantiation of the rational component and chemical composition of fluxes for the formation of a slag phase with given physical and chemical properties during the smelting of electric steel is given. It has been shown that when reducing the oxidation intensity of carbon in a metal melt and in the conditions of the extraction process for the formation of a stable gas-slag foam, the use of complex slag-forming mixtures containing natural minerals and man-made wastes on the basis of carbon and iron oxides is used. Increasing the efficiency of applying slag-forming mixtures with an adjustable $\text{CaO} : \text{CaCO}_3 : \text{C} : \text{Fe}_x\text{O}_y$ ratio is achieved by implementing a method for introducing a disperse material into a carrier gas stream with an oxidizing potential, depending on the carbon content in the metal. It is established that the most rational for conditions of oxygen-converter melting is the use of materials intended for use, which contain lime with cigarette butter 15 - 20%. The material is fed to the bath at the end of the oxidation period with a decrease in carbon content to 0.15-0.2% with a significant increase in the temperature of the liquid steel. For conditions of steel smelting in the chipboard, the cigarette can be 40 - 60%.

Вступ. Створення умов для проведення окислювально-відновних реакцій в заданому напрямі визначає технологічну суть основних металургійних процесів. Їх ефективність і завершеність залежить від повноти використання окислювально-відновлювальних потенціалів металеві, шлакової і газової фаз при їх взаємодії.

Досвід експлуатації споруджених в останні роки великовантажних конвертерів (понад 200 т) і дугових печей (80-300 т) показав, що застосування традиційних технологій знижує продуктивність цих агрегатів і не забезпечує отримання в них сталей високої якості.

При ретельному аналізі фізико-хімічних перетворень, що мають місце в основних процесах металургійного переділу при рафінуванні сталі в плавильних агрегатах і на випуску в ківш, доведенні сталі за складом і температурою методами позапі-

чної обробки, безперервному розливанню сталі можна зробити наступний узагальнюючий висновок. Вибір раціонального режиму шлакоутворення в кисневих конвертерах і ДСП повинен ґрунтуватися на дослідженні впливу хімічного і компонентного складу на фізико-хімічні властивості шлаку, що визначають його рафінувальну здатність. Не знижується роль шлакоутворення і при глибокому рафінуванні сталевих напівпродуктів в агрегаті УКП при вирішенні технологічних завдань по розкислюванню, десульфурзації і легуванню сталі, а також при безперервному розливанні сталі, коли визначальний вплив на якість сталі роблять процеси взаємодії між компонентами металеві, шлакової і газової фаз в проміжному ковші і кристалізаторі МБЛЗ.

Сучасний стан питання. При виплавці сталі в сучасній дуговій електропечі шлакова фаза відіг-

Камкін Володимир Юрійович – аспірант НМетАУ,
Токарев С.І. – аспірант НметАУ
Мішалкін Анатолій Павлович – к.т.н., доц. НметАУ
Анкудінов Руслан Валентинович – к.т.н., доц. НМетАУ.
Безшкуненко Олексій Георгійович – к.т.н., НМетАУ

Kamkin V. – postgraduate NMetAU
Tokarev S. – postgraduate NMetAU
Mishalkin A. - CtS assistant professor NMetAU
Ankudinov R. - CtS assistant professor NMetAU
Bezshkurenko O - CtS NMetAU

рає важливу роль в перерозподілі теплоти електричних дуг, у відмінності від умов рафінування сталі в кисневому конвертері, де джерелом теплоти є зона взаємодії кисневих струменів з домішками металеві ванни. Неодмінною умовою, що впливає на рівень витрат електричної енергії, визначаючи ефективність виплавки сталі в ДСП, є повне «затоплення» електричних дуг у шарі шлаку. При цьому схема перерозподілу теплоти реалізується через її передачу від шлаку до металу та добавок, що утворюють шлакову фазу. В іншому випадку при розкритті дуг спостерігається перегрів склепіння і вогнетривів бічних стін агрегату за рахунок випромінювання теплоти від відкритих дуг, що, в свою чергу, приводить до збільшення тривалості плавки і, відповідно, до перевитрати енергії. Швидкість нагріву рідкого металу, нагріву та асиміляції вапна шлаковою фазою, що утворюється в умовах окислювального рафінування, а також витрата електроенергії та електродів на тону сталі істотно залежать від ефективності використання теплоти електричних дуг [1].

Використання менш якісного лому, навіть при селективному його відборі і підготовці, призводить до нестабільності протікання періоду плавлення і значних коливань у кількості та складі шлаку, його основності та окислювального потенціалу, а також до значних коливань у вмісті вуглецю і фосфору в металі до моменту розплавлення твердої металошихти. Надалі по ходу плавки це не дозволяє досягти стабільності в організації режимів дуття та шлакоутворення в окислювальний період плавки. Іншим чинником, що визначає вибір раціональної технології плавки у великовантажних ДСП, являється невисока ефективність відновлювального періоду, оскільки практично неможливо отримати шлак з низьким вмістом FeO (нижче 1,5-2,0%) навіть при інтенсивній його обробці порошкоподібними розкислювачами.

Ще однією несприятливою особливістю роботи великовантажних сталеплавильних агрегатів є те, що при збільшенні тривалості циклу плавки посилюється розчинення в шлаку компонентів вогнетривів. Шлак в результаті цього містить підвищену кількість MgO і стає густим, знижується його реакційна здатність щодо видалення шкідливих домішок. Ці і інші чинники змусили металургів перейти від класичних технологій до розробки і впровадження нових продуктивніших різновидів спрощеної технології отримання сталевих напівпродукту з перенесенням ряду технологічних операцій в агрегати позапічної обробки сталі.

Оптимізація шлакового режиму може бути забезпечена також за рахунок використання нових шлакоутворюючих матеріалів рафінуючого призначення, у тому числі і на основі техногенних відходів в агрегатах поточного виробництва [2-5]. Досвід роботи ДСП зі спініеними шлаками показує, що формування добре спіненого шлаку забезпечується при основності шлаку $B = 1,8 - 2,3$, температурі ванни $1550 - 1580^{\circ}\text{C}$, вмісті в шлаку близько 20 -

24% FeO і 8 - 12% MgO та вмісті у металевій ванні 0,1 - 0,3% C [4, 6].

При значній витраті матеріалів, що необхідно для створення шлаку з заданими властивостями та призначенням, за рахунок реалізації ендотермічних реакцій шлакоутворення відбувається зниження температури металеві ванни. Згідно з даними [7,8] перегрів шлаку поверхневого шару відносно металу може складати від 50 до 150°C . Згідно з [9] можна прийняти, що 1 т вапняку охолоджує 100 т металу на 38°C , вапно – на 22°C , залізородні окислені окатиші – на 42°C . При температурі 1600°C і вмісті у вапні 5 та 8% недопалу його охолоджуюча здатність становить відповідно 1610 і 1680 кДж/кг.

Заміна вапна вапняком, на що вказується в [10] знижує вміст [N] до кінця плавлення приблизно на 0,002%. Для зведення шкідливого впливу азоту до мінімуму бажано отримувати сталь з вмістом цього елемента менше 0,004%, а його негативний вплив можна нейтралізувати шляхом введення елементів, що утворюють високоміцні нітриди [11].

Спінювання шлаку, що затруднює теплопередачу в мартенівських печах і конвертерах, особливо, в умовах допалювання газів CO до CO₂ є найважливішим технологічним прийомом, який сприяв остаточному затвердженню концепції швидкісної плавки в ДСП [12]. При зниженні вмісту вуглецю в металевому розплаві, особливо при позапічній обробці сталевих напівпродукту, рекомендують вводити в ванну вугільний порошок при його питомій витраті до 10 кг/т в потоці кисню з питомою витратою до 50 м³/т. Відомо, що утворення стійкого за часом спіненого шлаку залежить від таких властивостей шлаку як в'язкість, поверхневий натяг і температура, а також від інтенсивності і місця газовиділення, що визначається орієнтуванням пристрою для продувки і розподілу газових пухирів по розмірах. Спінюванню шлаку та стійкості піни, що утворюється, сприяють підвищена в'язкість шлакової фази, низький між фазний натяг, невеликий розмір і велика кількість бульбашок монооксиду вуглецю, який виділяється під час окислювального періоду електроплавки.

Раннє формування спіненого шлаку, згідно [12] призводить до зниження витрати електроенергії і скорочення тривалості плавки. При подальшому веденні плавки в піч необхідно безперервно або порціями присаджувати шлакоутворюючі компоненти і вуглецевмісні реагенти для підтримання необхідного складу шлаку. Вуглець рекомендується вдувати в зону нижче рівня розділу шлак - метал для поліпшення навуглецювання ванни. Більш ідеальною умовою для підтримки шлаків у спіненому стані є використання металізованих окатишів, що містять вуглець і кисень, які рівномірно вводяться в реакційну зону.

Спінювання шлаку прямо впливає тільки на вміст азоту в сталі. Гарне спінювання призводить до зниження його концентрації на 10 - 20 ppm до рівня близько 30 ppm за рахунок «промивання»

ванни в процесі більш інтенсивного зневуглецювання і в результаті кращого захисту металу від атмосфери печі шаром спіненого шлаку [12]. В роботі відзначені і негативні ефекти роботи зі спіеним шлаком. Один з них, ймовірно, пов'язаний з труднощами контролю швидкості окислення вуглецю, що вводиться в ванну і подальшого виділення продуктів реакції через електродні отвори. Крім того, окислення веденого вуглецю призводить до збільшення об'єму технологічних газів, що утворюються, в 1,5 рази і їх тепловміст в 2,5 рази, що вимагає підвищення потужності і об'ємів системи газовідведення.

Особливу увагу при вдосконаленні технології виплавки електросталі необхідно приділяти відпрацюванню шлакового режиму, що забезпечує, при оптимізації хімічного складу шлаку, максимальну стійкість футеровки печі. Досягається це, наприклад, шляхом присадки допоміжних шлакоутворюючих матеріалів (зокрема, доломіту) у відповідній кількості в різні періоди плавки.

Важливою проблемою при вдосконаленні шлакового режиму виплавки сталі в ДСП є фізико-хімічне обґрунтування найбільш раціонального компонентного та хімічного складу флюсів, що необхідно для утворення шлакової фази, фізико-хімічні властивості якої забезпечать високі показники та енергоефективний режим виплавки електросталі.

Завдання дослідження. Аналіз впливу дослідних шлакоутворюючих матеріалів на основі техногенних відходів на режим шлакоутворення та особливості виплавки низьковуглецевої електросталі, обґрунтування раціональної схеми застосування дослідних матеріалів шляхом їх введення у вигляді брикетів та дисперсних матеріалів в потоці газових струменів з регульованим окислювальним потенціалом, для утворення стійкої за часом шлакової піни.

Викладення основних результатів роботи.

На першому етапі дослідження вивчали кінетику розчинення вапна в шлаку окислювального періоду виплавки сталі в ДСП шляхом введення на поверхню ванни високотемпературної моделі печі (40 кг; ЛПЗ-67 з періклазовим футеруванням) при використанні вапняків фракції 3 і 10 мм з різним ступенем випалу. Температура металу і шлаку становила $\sim 1600^\circ\text{C}$. Визначали час процесу, за який відбувалася залишкова дисоціація дослідних шматочків вапняку фракції 3 і 10 мм з різним недопалом (20 і 60%), що вводились на поверхню пічного шлаку в кількості 5-8% від маси рідкого металу і, власне, розчинення вапна, що утворювалося. Для цих умов зниження температури ванни рідкого металу, що знаходився під вогнетривкою теплозахисною кришкою без струмового навантаження, після повної асиміляції вапна шлаком, склало близько $6\div 8^\circ\text{C}$ для вапна з недопалом 20% і близько $10\div 12^\circ\text{C}$ для вапна з недопалом 60%.

З метою визначення ефективності використаних шлакоутворюючих дослідних сумішей, отрима-

них шляхом спільної теплової обробки суміші на основі техногенних відходів, що містять відсів вапняку (0-5мм), матеріали, що містять оксиди заліза, кремнію, алюмінію, марганцю, лужних металів і вуглецю, співвідношення яких забезпечує переведення фосфору в шлак в період окислювального рафінування [13]. Ступінь недопалу після проведення спільної теплової обробки вихідної суміші компонентів - відходів склала близько 30%.

Встановлено, що при реалізації цього варіанту використання дослідного матеріалу з прогнозованим функціональним призначенням досягнуто більш низький вміст фосфору. Так, при застосуванні кускового вапна його вміст склав 0,0085%, а при введенні дослідного комплексного матеріалу - 0,0068%.

Отриманий позитивний ефект дефосфорації сталі можна пояснити прискоренням процесу розчинення вапна в присутності оксидів заліза та марганцю за рахунок інтенсивного виділення у шлаку при остаточній дисоціації вапняку бульбашок CO_2 та CO , які сприяють більш інтенсивному оновленню реакційної поверхні шматків вапна. Враховуючи наявність при асиміляції CaO шлаком двох дифузійних потоків, можна стверджувати, що ведення шлакоутворення в умовах ДСП з застосуванням матеріалів, що містять недопалене вапно, сприяє прискоренню зовнішнього потоку шлакової фази до поверхні шматків вапна.

Згідно з даними [14] при використанні шматкового вапна за перші 2-3 хвилини нагріву \sim до 1150°C і вище різко зменшується реакційна здатність вапна, що обумовлено укрупненням її зерен внаслідок спікання і рекристалізації. Це може призводити до зникнення з поверхні шматка вапна численних пір, нівелюючи переваги м'якообпаленого вапна. В разі використання дослідних матеріалів термічний удар, який одержують шматки вапна з недопалом, приводить до суттєвого зниження вірогідності укрупнення його зерен внаслідок спікання і рекристалізації.

Таким чином підтверджена ефективність застосування комплексних шлакоутворюючих із заданим ступенем випалу вапняку, яка досягається в процесі спільної термічної обробки компонентів вихідної суміші, при виплавці сталі в ДСП.

Враховуючи, що інтенсивність та особливості шлакоутворення в ванні ДСП при використанні вапняку будуть визначатися, в основному швидкістю його дисоціації та асиміляції шматків CaO , що утворилися, в шлаковій фазі, можна припустити, що раціональним способом спінування шлакової фази є забезпечення рівномірно-розсередженого подача на поверхню шлаку недопаленого вапна.

Раціональний ступінь дисоціації вапняку має бути обґрунтовано з урахуванням зниження температури металевої та шлакової фаз за рахунок протікання ендотермічної реакції дисоціації CaCO_3 , тобто, на підставі результатів експериментальної перевірки шляхом порівняльної оцінки додаткових витрат електричної енергії і ефектів від роботи під

шлаком, що спінюється. Доцільність застосування нових шлакоутворюючих матеріалів повинна визначатися для конкретних умов підприємства на основі аналізу особливостей технології виплавки в ДСП і обробки сталі на У КП з урахуванням економічних, експлуатаційних, технологічних, енергетичних і екологічних аспектів діючих технологій.

З використанням розробленого алгоритму спрощеного розрахунку матеріального і теплового балансів (на 100 кг сталі 08Ю) визначено ефекти охолодження ванни ДСП при введенні в сталеплавильну ванну кускового вапна з різним ступенем дисоціації. При цьому враховувалися ефекти від дисоціації вапняку та об'ємів CO_2 , що утворюються при різних ступенях дисоціації вапняку в %: 95, 90,

80, 70, 60, 50 і 0% (відповідно ступінь недопалу: 5, 10, 20, 30, 40, 50 і 100%).

Ефект охолодження або витрата теплоти на розрахункову ступінь дисоціації в кДж/кг розраховували за виразом:

$$Q = C_{\text{сер. (CaO)}} \cdot t + (g_h/100) \cdot 1790, \text{ кДж/кг}, \quad (1)$$

де $C_{\text{сер. (CaO)}}$ - середня теплоємність CaO в інтервалі температур від 0 до 1600°C (0,95 кДж/(кг·К); t – 1873К; g_h – ступінь недопалу в %; 1790 – теплота розкладання CaCO_3 , кДж/кг.

Результати розрахунків значень вмісту CO_2 , що утворюються при дисоціації вапняку та теплових ефектів охолодження металеві ванни при використанні вапна з різним ступенем недопалу, приведені на рисунках 1, 2.

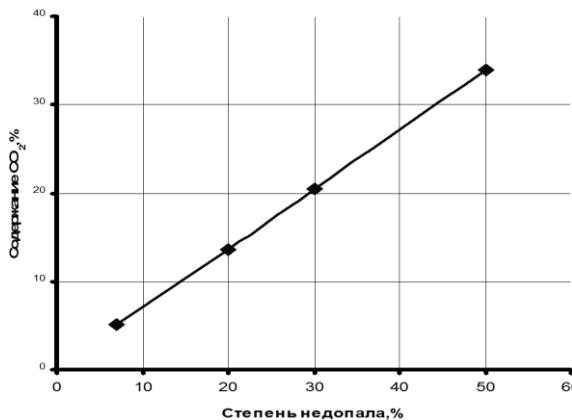


Рисунок 1. - Вплив ступеню недопалу вапна на вміст CO_2

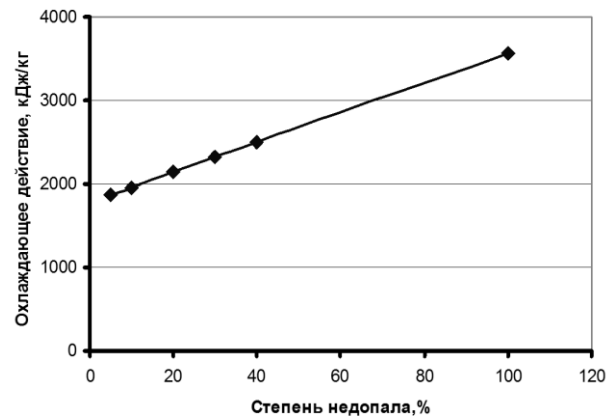


Рисунок 2 - Вплив ступеню недопалу вапна на ефект охолодження сталі

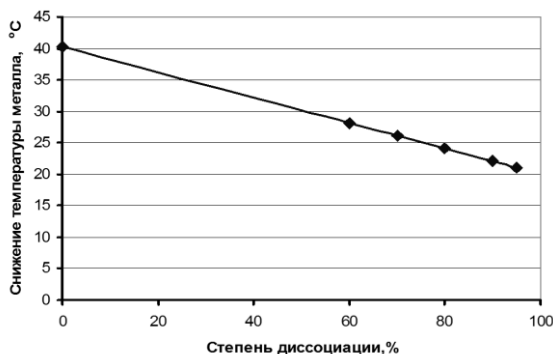


Рисунок 3 - Вплив ступеню дисоціації вапна на зниження температури металеві ванни

Зміна температури ванни Δt в °C при введенні 1% добавки вапна з різним ступенем дисоціації (1 кг на 100 кг металу) можна приблизно визначити по рівнянню:

$$\Delta t = Q/101(C_{\text{сер.Ст.}} + 0,15 C_{\text{сер. Шл.}} + 0,1 C_{\text{сер. Фуг.}}), \quad (2)$$

де Q - охолоджувальний ефект добавки, кДж/кг; 0,15 - масова доля шлаку по відношенню до маси металу; 0,1 - масова доля активного шару футерування, що бере участь в теплообміні, по відношенню до маси металу; $C_{\text{сер.Ст.}}$ - середня питома теплоємність рідкої сталі (0,84 кДж/(кг·К)); $C_{\text{сер. (Шл)}}$ і $C_{\text{сер. (Фуг)}}$ - середні питомі теплоємності шлаку 1,2

кДж/ (кг·К) і футерування, яке можна прийняти рівним теплоємності шлаку.

Розрахункові значення величин падіння температури металу при введенні дослідного матеріалу з різним ступенем дисоціації приведені на рис.3.

Розрахунковим методом встановлено, що витрати теплоти при використанні вапна с недопалом 7% (вапно, що використовується в металургійних процесах) складають в сумарних теплових витратах біля 1%, при використанні вапна с недопалом 20% витрати підвищуються до 2,5%.

Доцільно, при зниженні інтенсивності окислювання вуглецю металевого розплаву та в умовах позапічної обробки для утворення стійкої за часом існування газо-шлакової піни, застосовувати комплексні шлакоутворюючі, вихідний компонентний склад яких може бути збалансовано за вмістом природних мінералів та техногенних відходів на основі вуглецю, оксидів заліза при обґрунтованому, в залежності від реальних умов виплавки сталі, співвідношення вапна та вапняку, або відходів на їх основі. Підвищення ефективності застосування шлакоутворюючих сумішей з регульованим співвідношенням CaO, CaCO_3 , C і Fe_xO_y може бути досягнуто за рахунок реалізації способу введення дисперсного матеріалу в потоці газу-носію з регульованим, в залежності від вмісту в металі вуглецю, окислювальним потенціалом. В цьому випадку

зменшується вміст в шлакоутворюючій суміші оксидів заліза, що знижує ефект охолодження від ендотермічної реакції окислювання вуглецю розплаву оксидом заліза, а продування металевої ванни та шлаку інтенсифікує утворення бульбашок CO та Ar.

Параметри теплової обробки вихідних сумішей на основі матеріалів, що містять CaO, CaCO₃, Al₂O₃, SiO₂, FeO та інш. повинні забезпечувати, в залежності від реальних умов застосування і функціонального призначення шлакоутворюючого матеріалу (окислювальний період плавки, позапічна обробка) і вирішуваних завдань, необхідну кількість і співвідношення вказаних компонентів. В якості зазначених матеріалів з метою вирішення проблеми ресурсозбереження доцільно використовувати при виробництві нових матеріалів цільового призначення, шляхом теплової обробки вихідних сумішей, техногенні відходи металургійного та інших виробництв та вуглецьвмісні матеріали рослинного походження.

Доцільним є також застосування шлакоутворюючих сумішей з регульованим співвідношенням CaO, CaCO₃ та Fe_xO_y, що вводяться у ванну в струменях газу зі зміною, залежно від вирішуваної задачі, його окислювального потенціалу шляхом зміни співвідношення (O₂ : Ar).

ВИСНОВКИ

1. При вдосконаленні технології виплавки електросталі особлива увага приділяється відпрацюванню шлакового режиму, що забезпечує, при оптимізації хімічного складу шлаку, максимальну стійкість футеровки печі. Досягається це, наприклад, шляхом присадки допоміжних шлакоутворюючих матеріалів (зокрема, доломіту) у відповідній кількості в різні періоди плавки. Фізико-хімічне обґрунтування найбільш раціонального компонентного та хімічного складу флюсів, що необхідно для утворення шлакової фази з заданими фізико-хімічними властивостями забезпечать високі показники та енергоефективний режим виплавки електросталі.

2. Доцільно, при зниженні інтенсивності окислювання вуглецю металевого розплаву та в умовах позапічної обробки для утворення стійкої за часом існування газо-шлакової піни, застосовувати комплексні шлакоутворюючі, вихідний компонентний склад яких може бути збалансовано за вмістом природних мінералів та техногенних відходів на основі вуглецю, оксидів заліза при обґрунтованому, в залежності від реальних умов виплавки

сталі, співвідношення вапна та вапняку, або відходів на їх основі.

3. Кількість теплоти, необхідної на процес дисоціації вапняку з недопалом 5 - 7% становить близько 1% всіх теплових витрат в тепловому балансі плавки і підвищується до 2,5% при використанні матеріалу зі ступенем дисоціації 60%. Ефект зниження температури рідкого металу та шлаку при використанні вапна з різним ступенем випалу може бути усунутий за рахунок використання різних методів: використання добавок твердого палива, допалювання CO або за рахунок додаткової витрати електроенергії.

4. Більш ефективним способом, розробленим на кафедрі ТМП та Х, є застосування комплексних матеріалів на основі вапняків зі ступенем дисоціації 40 - 60%, вуглецю рослинного походження, оксидів заліза, кремнію, алюмінію, марганцю, магнію та лужних металів, що дозволяє формувати на більш ранній стадії плавки активний, високоосновний шлак, що сприяє більш повному видаленню з металу фосфору і сірки.

5. Підвищення ефективності застосування шлакоутворюючих сумішей з регульованим співвідношенням CaO : CaCO₃ : C : Fe_xO_y может бути досягнуто за рахунок реалізації способу введення дисперсного матеріалу в потоці газу-носію з регульованим, в залежності від вмісту в металі вуглецю, окислювальним потенціалом. У цьому випадку зменшується в шлакоутворюючому матеріалі вміст оксидів заліза, що, відповідно, знижує ефект охолодження ендотермічної реакції окислювання вуглецю розплаву оксидом заліза.

6. Доцільно, при зниженні інтенсивності окислювання вуглецю металевий розплаву в окислювальний період плавки та в умовах позапічної обробки для утворення стійкої за часом існування газо-шлакової піни, застосовувати комплексні шлакоутворюючі матеріали. Їх вихідний компонентний склад может бути збалансовано за вмістом природних мінералів та техногенних відходів на основі вуглецю, оксидів заліза при обґрунтованому, в залежності від реальних умов, співвідношення вапна та вапняку, або відходів на їх основі.

7. Встановлено, що найбільш раціональним для умов киснево-конвертерної плавки є застосування матеріалів цільового призначення, які містять вапно з недопалом 15 - 20%, в кінці окислювального періоду при зниженні вмісту вуглецю до 0,15 - 0,2% при значному підвищенні температури рідкої сталі. Для умов виплавки сталі в ДСП недопал может становити 40 - 60%.

Бібліографічний опис

1. Лякишев Н.П., Снитко Ю.П., Оржех И.М. Передача тепла от электрических дуг ванне расплавленного металла в сверхмощной дуговой сталеплавильной печи // Изв. ВУЗов, Черная металлургия. -1991. - № 3. – С. 29 -31.
2. Rodolfo D Morales, R. G. Lule, Francisco López, Jorge Camacho./The Slag Foaming Practice in EAF and Its Influence on the Steelmaking Shop Productivity. Article (PDF Available) in ISIJ International 35(9):1054-1062 · January 1995 with 938 Reads.

DOI: 10.2355/isijinternational.35.1054.

3. Guangsheng Wei, Rong Zhu, Xuetao Wu, Kai Dong, Lingzhi Yang, Runzao Liu. Technological Innovations of Carbon Dioxide Injection in EAF-LF Steelmaking Article in JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society 70(11) · March 2018 with 116 Reads , Volume 70, Issue 6, pp 969–976 DOI: 10.1007/s11837-018-2814-3
4. Проїдак Ю.С., Камкіна Л.В., Мешалкін А.П., Сокур Ю.І., Дерев'яненко І.В., Васильєв Д.П. Применение известняка при выплавке стали. Опыт работы и предложения. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 2012. - № 7. – С. 102 – 103
5. A. Yu. Kem. Metallurgist January 2018, Volume 61, Issue 9–10, pp 751–757| Cite as Use of Alternative Carbon Sources for Slag Foaming in Electric Arc Furnaces DOI: 10.1007/s11015-018-0559-4
6. Совершенствование технологии выплавки стали в современной дуговой электропечи с использованием математического моделирования. Диссертация канд. техн. наук Малофеева А.Е. специальность 05.16.02. Магнитогорск, 2010. – 130 с.
7. Производство стали на агрегате ковш-печь / Д.А. Дюдкин, С.Ю. Бать, С.Е. Гринберг и др.: Донецк: ООО «Юго – Восток» ЛТД, 2003. – 300с.
8. Сосонкин О.М., Шишимиров М.В. Особенности теплообмена в дуговой сталеплавильной печи // *Сталь*. – 2004. -№8. –С. 34-36.
9. Кочо В.С., Ерошенко В.А. Физико-химические и теплофизические особенности современного мартеновского процесса. – М.: *Металлургия*. 1974. – 224 с.
10. Линчевский Б.В. Термодинамика и кинетика взаимодействия газов с жидкими металлами. М.: *Металлургия*, 1986. - 222 с.
11. Поволоцкий Д.Я., Рощин В.Е. и др. *Электрометаллургия стали и ферросплавов*. - М.: *Металлургия*, 1984.- 568 с.
12. Г.А.Попухов. Применение кислорода в дуговых сталеплавильных печах. // *Электрометаллургия* № 3. С.2 – 26. 2005
13. А.П. Мешалкин, В. Ю. Камкин, Синицын Я.С. Надточий А.А. Показатели и кинетические особенности десульфурации и дефосфорации при использовании опытных шлакообразующих смесей. *Теория и практика металлургии*, № 3-4, Днепрпетровск, 2017. - с. 168-173.
14. Баптизманский В.И., Охотский В.Б. Физико – химические основы кислородно – конвертерного процесса. Киев. *Техника*. – 1981. – 211 с. 3-8.

Reference

1. Lyakishev N.P., Snitko Yu.P., Orzheh I.M. Peredacha tepla ot elektricheskikh dug vanne raspvlennogo metala v sverhmoshnoy dugovoy staleplavilnoj pechi // *Izv. VUZov, Chernaya metalurgiya*. -1991. - № 3. – S. 29 -31.
2. Rodolfo D Morales, R. G. Lule, Francisco Lopez, Jorge Camacho./The Slag Foaming Practice in EAF and Its Influence on the Steelmaking Shop Productivity. Article (PDF Available) in *ISIJ International* 35(9):1054-1062 • January 1995 with 938 Reads. DOI: 10.2355/isijinternational.35.1054.
3. Guangsheng Wei, Rong Zhu, Xuetao Wu, Kai Dong, Lingzhi Yang, Runzao Liu. Technological Innovations of Carbon Dioxide Injection in EAF-LF Steelmaking Article in JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society 70(11) • March 2018 with 116 Reads , Volume 70, Issue 6, pp 969–976 DOI: 10.1007/s11837-018-2814-3
4. Proidak Yu.S., Kamkina L.V., Meshalkin A.P., Sokur Yu.I., Derevyanchenko I.V., Vasilev D.P. Prime-nenie izvestnyaka pri vyplavke stali. Opyt raboty i predlozheniya. *Metallurgicheskaya i gornorud-naya promyshlennost*, 2012. - № 7. – S. 102 – 103
5. A. Yu. Kem. Metallurgist January 2018, Volume 61, Issue 9–10, pp 751–757| Cite as Use of Alternat - ve Carbon Sources for Slag Foaming in Electric Arc Furnaces DOI: 10.1007/s11015-018-0559-4
6. Covershenstvovanie tehnologii vyplavki stali v sovremennoj dugovoy elektropechi s ispolzova-niem matematicheskogo modelirovanii. Dissertaciya kand. tehn. nauk Malofeeva A.E. special-nost 05.16.02. Magnitogorsk, 2010. – 130 s.
7. Proizvodstvo stali na agregate kovsh-pech / D.A. Dyudkin, S.Yu. Bat, S.E. Grinberg i dr.: Doneck: ООО «Yugo – Vostok» LTD, 2003. – 300s.
8. Sosonkin O.M., Shishimirov M.V. Osobennosti teploobmena v dugovoy staleplavilnoj pechi // *Stal*. – 2004. -№8. –S. 34-36.
9. Kocho V.S., Eroshenko V.A. Fiziko-himicheskie i teplofizicheskie osobennosti sovremennogo martenovskogo processa. – М.: *Металлургия*. 1974. – 224 с.

10. Linchevskij B.V. Termodinamika i kinetika vzaimodejstviya gazov s zhidkimi metallami. M.: Metallurgiya, 1986. - 222 s.
11. Povolockij D.Ya., Roshin V.E. i dr. Eletrometallurgiya stali i ferrosplavov.- M.: Metallurgiya, 1984.- 568s.
12. G.A.Lopuhov. Primenenie kisloroda v dugovyh staleplavilnyh pechah. //Elektrometallurgiya № 3. S.2 – 26. 2005
13. A.P. Meshalkin, V. Yu. Kamkin, Sinicyn Ya.S. Nadtochij A.A. Pokazateli i kineticheskie osobennosti desulfuracii i defosforacii pri ispolzovanii opytnyh shlakoobrazuyushih smesej. Teoriya i praktika metallurgii, № 3-4, Dnepropetrovsk, 2017. - s. 168-173.
14. Baptizmanskij V.I., Ohotskij V.B. Fiziko – himicheskie osnovy kislorodno – konverternogo pro-cessa. Kiev. Tehnika. – 1981. – 211 s. 3-8.

Стаття поступила 4.11.2018