Ю. В. Климчик

ООО «ИНТЕРПАЙП УКРАИНА», г. Днепро,
Украина

e-mail: yuriy.klimchik@interpipe.bis

М. И. Гасик /д. т. н./, А. П. Горобец

Национальная металлургическая академия
Украины, г. Днепро, Украина

e-mail: gasikmi@i.ua; gorobets.dnepr@gmail.com

Теоретическое обоснование и разработка шлакового режима обработки колесной стали на установке ковш-печь с целью снижения удельного расхода электроэнергии

Y. V. Klimchik

«INTERPIPE UKRAINE» LLC, Dnipro, Ukraine

e-mail: yuriy.klimchik@interpipe.bis

M. I. Gasik /Dr. Sci. (Tech.)/, A. P. Gorobets

National Metallurgical Academy of Ukraine,
Dnipro, Ukraine

e-mail: gasikmi@i.ua; gorobets.dnepr@gmail.com

Theoretical justification and development of the slag mode for treatment of wheel steel on the installation of a bucket-oven with a purpose to reduce the specific electric energy

Цель. Управление режимом формирования оксидно-фторидного шлака на стадии внепечной обработки колесного металла.

Методика. Исследования энерготехнологических режимов внепечной обработки колесной стали выполнялись методом анализа показателей базовой технологии обработки металла на установке ковш-печь.

Результаты. Установлен оптимальный режим ввода плавикового шпата при формировании ковшевого шлака на установке ковш-печь.

Научная новизна. Аналитическими исследованиями подтверждено отсутствие в составе оксидно-фторидного шлака структур, содержащих плавиковый шпат. Его роль при формировании ковшевого шлака определяется как деполимеризатора пространственных кремнекислородных группировок и, как следствие, повышения жидкотекучести расплава при одновременном повышении окислительного потенциала шлака.

Практическая значимость. Результаты проведенного исследования определяют граничные пределы содержания CaF_2 в составе ковшевого шлака и позволяют на 30–35 % снизить расход электроэнергии при формировании шлака на установке ковш-печь. (Ил. 3. Табл. 4. Библиогр.: 10 назв.)

Ключевые слова: колесная сталь, дуговая электропечь, металл-полупродукт, раскислители, легирующие, шлакообразующие материалы, плавиковый шпат, установка ковш-печь, экономия электроэнергии.

DOI: 10.33101/S0654231678

Технология рафинирования металла на установках ковш-печь шлаковыми системами с контролируемыми физико-химическими характеристиками представляет практический и научный интерес с позиций обеспечения нормированных требований к качеству металла для железнодорожных колес. Сквозная технологическая схема производства электростали для получения непрерывнолитых заготовок для цельнокатаных железнодорожных колес в условиях МЗ «Днепро-

сталь» включает следующие стадии: выплавку металла-полупродукта в дуговой электропечи ДСП-190 с эркерным выпуском 160 т металла в сталеразливочный ковш, присадка по ходу наполнения ковша раскислителей, легирующих, науглероживателя и шлакообразующих материалов. На последующих стадиях колесная сталь подвергается обработке в ковше-печи (УКП) с целью десульфурации и раскисления с дальнейшей передачей ковша на вакуумирование для

окончательного раскисления. Непрерывная разливка стали производится на 4-ручьеваой МНЛЗ радиального типа с получением заготовок колесной стали диаметром 450 мм [1].

Обработка и анализ данных плавов и внепечной обработки колесной стали показывает, что из-за несовершенства режима присадки материала в ковш при выпуске металла-полупродукта из ДСП-190, в ковш на УКП и в ковш перед вакуумированием повышается удельный расход электроэнергии при обработке колесной стали на УКП.

По ныне действующей технологии, уточненной по сравнению с проектными показателями, расход присаживаемых в ковш материалов по ходу выпуска металла-полупродукта из печи в ковш составляет в среднем (кг на плавку): 1300 кг МнС17, 600 кг ФС65, 700 кг углерода, 45 кг Al, 1200 кг извести (ранее присаживали обожженный доломит или импортный боксит). При этом в ковш также поступает 120 кг материала для засыпки выпускного отверстия эркера состава 45-47 % MgO, 37-39 % SiO₂, 9 % Fe₂O₃ и стартовой смеси в количестве 0,1 кг/т для канала шиберного затвора сталеразливочного ковша состава 19 % SiO₂, 37,5 % Cr₂O₃, 21,1 % Fe₂O₃, 11,9 % Al₂O₃, 8 % MgO. Для расплавления указанного количества ферросплавов, шлакообразующих материалов металл-полупродукт перегревается, так что перед выпуском его из печи ДП 190 в ковш его температура должна быть в интервале 1625-1630°C.

В результате реакций раскисления металла в ковше алюминием и легирования кремнием в формирующемся шлаке из извести, материалов засыпки эркера и канала шиберного затвора ковша повышается содержание Al₂O₃ и SiO₂. Однако количество формирующегося на первом этапе шлакового расплава не достаточно для ассимиляции извести шлаком. Поэтому за время выдержки металла в ковше и перед подачей его на установку ковш-печь (УКП) часть присаживаемой извести находится в ошлакованном виде.

На УКП производится корректировка химсостава стали добавками высокоуглеродистого ферромарганца ФМн78, ферросилиция ФС65.

Чтобы обеспечить расплавление ошлакованной извести, компенсировать тепло, расходуемое на расплавление корректирующих добавок (ФМн78, ФС65), на УКП металл нагревается до температур 1615-1620 °C перед подачей его на вакуумирование. Расход электроэнергии при обработке металла в ковше-печи достигает ~7000 кВт·ч на плавку. По проекту предусматривается применение плавикового шпата в количестве 1,4 кг/т стали (225 кг на плавку 160 т) [2]. Причем плавиковый шпат должен присаживаться в ковш после обработки колесной стали на УКП, т.е. перед вакуу-

мированием металла. Недостатки этого варианта использования плавикового шпата проявляются не только в том, что его «разжижающие» свойства не реализуются на первых стадиях обработки металла в ковше, но и в существенном снижении вязкости шлака при вакуумировании, что сопровождается интенсивным выплеском шлака за борт ковша при создании в камере вакуума, а также в ходе вакуумирования.

Физико-химические предпосылки выбора рационального режима присадок полевого шпата при внепечной обработке колесной стали

Одной из целевых задач внепечной обработки является десульфурация металла шлаковыми расплавами на основе оксидно-фторидной системы CaO-CaF₂ (рис. 1).

Рис. 1. Диаграммы плавкости системы CaO-CaF₂. 1 – по Будникову [3], 2 – по Эйтелю [4]

Приведенные диаграммы плавкости свидетельствуют о существовании при температурах сталеплавильного процесса (≤ 1600 °C) гомогенного шлакового расплава при весовом соотношении CaO/CaF₂, равном 3:1. Указанное содержание компонентов обеспечивает фазовый состав оксидно-фторидного расплава, приближающийся к температурным условиям формирования эвтектики в системе CaO-CaF₂ ($t_{\text{пл.}} = 1360$ °C, при 80% мол. CaF₂).

При сравнении термохимических характеристик системы CaO-Al₂O₃, также используемой в качестве десульфорирующей шлаковой системы, и шлакового расплава системы CaO-CaF₂ менее энергоемким для формирования шлаковой рафинирующей системы является применение плавикового шпата с энтальпией плавления $\Delta H_{\text{пл.}}$, равной 30 кДж/моль против 117,15 кДж/моль для Al₂O₃. В результате взаимодействия шлака с огнеупорами футеровки ковша, частичного окисления легирующих, базовый состав шлака системы CaO-CaF₂ трансформируется в многокомпонентную оксидно-фторидкальциевую систему CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-CaF₂.

Температуры плавления шлаков этой системы могут быть оценены при анализе первичных полей кристаллизации системы $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CaF}_2$ (рис. 2).

Рис. 2. Фазовые равновесия и температурно-концентрационные поля трёхкомпонентной системы $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ с 10% CaF_2 [5]

Установлено неоднозначное влияние добавок CaF_2 к составам указанной системы: наличие CaF_2 в количестве до 1,5 % способствует минералообразованию первичных шлаков, превышение же содержаний CaF_2 более 5 % не только приводит к снижению на 70-120 °С температуры точек невариантных равновесий, но и смещает поля кристаллизации геленита $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ к стороне $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ концентрационного треугольника, уменьшает поля устойчивости метасиликата кальция $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, ранкинита $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2$ и анортита $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ [5].

В трёхкомпонентной системе $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ с 10% CaF_2 наблюдается значительное увеличение концентрационного поля существования двух несмешивающихся жидкостей, ограниченного кривой с началом, соответствующим 5 % Al_2O_3 на стороне $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ и окончанием в точке 27,6 % CaO на стороне CaO-SiO_2 концентрационного треугольника (рис. 2).

Химико-минералогический анализ состава фаз, образующихся как первичные шлаки на начальных этапах кристаллизации расплава, свидетельствуют о том, что CaF_2 не участвует в реакциях минералообразования и проявляет (особенно в высококремнеземистом расплаве) свойства деполимеризатора, разрывая цепочные структуры $\text{Si}:\text{O}:\text{Si}$ и повышая содержание анионов кислорода в расплаве по схеме:

Очевидно протекание реакции (1) изменяет не только физические свойства расплава, но и окислительный потенциал шлаковой системы, не-

посредственно влияющий на активность растворенных в металле кислорода и серы. Протекание реакции десульфурации шлаковыми системами определяется достижением баланса между металлом и шлаком, активностью кислорода в металле, составом шлака и металла и с учетом относительного веса шлака.

$$[S]_{\text{кон.}} = \frac{\alpha_{[\text{O}]} \left((S)_{\text{шл.}} + \frac{[S]_{\text{нач.}}}{m} \right)}{f_S \cdot C_S + \frac{\alpha_{[\text{O}]}}{m}}. \quad (2)$$

где $S^{\text{нач.}, \text{кон.}}$ – содержание серы в металле перед и в конце десульфурации;

$\alpha_{[\text{O}]}$ – активность кислорода в металле;

f_S – коэффициент активности серы;

C_S – сульфидная емкость шлака;

m – относительный вес шлака (кг) на кг стали.

Термодинамическая модель поведения CaF_2 в бинарных и более сложного состава системах дает возможность рассматривать свойства указанных систем на основе теории ионных растворов, принимая активность элемента тождественно равной его ионной доле. Развивая теорию строения шлаков как ассоциированных растворов, исследователи [6] отмечают слабое межчастичное взаимодействие CaF_2 с расплавом системы $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, исключая тем самым участие CaF_2 в процессе формирования шлаковых расплавов, и аппроксимируют свойства жидких расплавов наличием в их составе комплексов (ассоциатов) $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ и сеток SiO_2 . В рамках данной теории предполагается отсутствие таких модельных структур, как фторсодержащие молекулы и комплексы типа Me-F (CaF , SiF). В тоже время спектроскопическими исследованиями закристаллизованных составов системы $\text{Ca-Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ зафиксировано наличие комплексов $\text{Al}_x^+ (\text{Al}_6^{3+}, \text{AlF}_3^{2-})$, что свидетельствует об участии ионов фтора в деформации кристаллохимических структур Al_2O_3 . В системе CaO-CaF_2 проявляющей положительные отклонения активности a_{CaF_2} в области повышенных содержаний CaF_2 , имеет место межмолекулярное взаимодействие компонентов, что позволяет оценить значение избыточной энергии смешения ΔG^E в терминах теории регулярных растворов (теплота образования раствора отличается от нуля ($\Delta H^E \neq 0$), энтропия смешения равна энтропии идеального раствора ($\Delta S^E = -R \sum_i \ln x_i$) [7]:

$$\Delta G^E = L_{1,x}(\text{CaO})[1 - x(\text{CaO})] + L_{2,x} \cdot [x(\text{CaO})]^2 \cdot [1 - x(\text{CaO})]^2, \quad (3)$$

где L_i – параметр, характеризующий температурную зависимость энергии смешения ΔG^E ;

$x(\text{CaO})$ – мольная доля CaO ,

$$(L_1 = RT(3,84 - 0,001087T); \\ L_2 = -RT(11,87 - 0,00472T); \text{Дж.})$$

Анализ зависимости (3) свидетельствует, что влияние температуры шлакового расплава на значение энергии смешения компонентов ΔG^E незначительно и максимальное значение ΔG^E приобретает для составов с высоким содержанием фторида кальция. Так, на заключительных стадиях затвердевания маточного раствора, обогащенного фторидом, как наиболее легкоплавкой составляющей системы $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CaF}_2$, происходит формирование упорядоченных фазовых структур, содержащих фторидные компоненты – $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{CaF}_2$ (куспидин), $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaF}_2$.

По действующей на предприятиях практике рафинирования металла шлаками состава $\text{CaO}/\text{CaF}_2 = 3/1$ при содержании CaF_2 в пределах 20–10 % вес. (первое значение – начальное содержание CaF_2 , второе – по ходу обработки металла) фторид кальция повышает содержание анионов кислорода в расплаве за счет реакции деполимеризации структур $(\text{SiO}_4)^{4-}$ по реакции (1) и повышает основность шлака в ходе протекания реакции (4).

Учеными кафедры электрометаллургии ДМетИ профессором Н. М. Чуйко и В. Б. Рутковским [8] были выполнены исследования влияния CaF_2 на активность FeO и содержание кислорода в углеродистой (~1 % С) подшипниковой стали ШХ15. На основании статистической обработки данных промышленных плавов впервые было установлено, что с увеличением содержания CaF_2 в печных основных шлаках от 0,5 до 5 % повышается концентрация кислорода в стали:

Содержание, %, (пределы/среднее)

(CaF_2)	$\frac{0,5-2,0}{1,2}$	$\frac{2,0-4,0}{3,0}$	> 5
$[\text{O}]_{\text{Fe}}$	0,0023	0,0027	0,0031
количество плавов	46	27	14

Установленная зависимость объяснена тем, что «...фторид кальция резко снижает растворимость окислов железа в шлаке» [8], т.е. повышает активность закисы железа и тем самым содержание растворенного в стали кислорода.

На основании данных проведенных промышленных плавов стали ШХ15 в условиях ПАО ДСС с рафинированием в ковше печными шлаками (без УКП) с различным содержанием CaF_2 установлена эмпирическая зависимость коэффици-

ента активности закисы железа в шлаке (f_{FeO}) от содержания в нем CaF_2 [8].

$$f_{\text{FeO}} = 1 + 5,18 \cdot 10^{-2} (\text{CaF}_2) + 6,32 \cdot 10^{-3} (\text{CaF}_2)^2 \quad (5)$$

Зависимость $a_{\text{FeO}} = f_{\text{FeO}} N'_{\text{FeO}}$ при концентрациях CaF_2 в шлаке от 0 до 10 % приведена на рис. 3, где нанесены также экспериментальные значения α_{FeO} с учетом f_{FeO} для отдельных проб ковшового шлака 70 плавов с разным содержанием CaF_2 . Молярная доля FeO в шлаке (N'_{FeO}) рассчитывается по методу Н.М. Чуйко, основанному на теории строения шлаков как системы с частично диссоциированными молекулами [9].

Рис. 3. Влияние фтористого кальция на активность закисы железа (α_{FeO}): в ковшовых шлаках; числа 0...10 – содержание CaF_2 [8]

Из данных, приведенных на рис. 3, следует, что активность закисы железа a_{FeO} шлаков с CaF_2 менее 2,5 % в 1,5-2 раза ниже, чем в шлаках с высокой концентрацией CaF_2 (5-10 %). На основании экспериментальных исследований и обработки полученных данных сделаны два вывода [8]: 1) «...не следует злоупотреблять плавиковым шпатом для разжижения шлака, особенно перед выпуском стали; 2) шлаки, содержащие фтористый кальций, должны более тщательно раскисляться для достижения содержания (FeO) менее 0,2 %».

Повышение содержаний CaF_2 в составе рафинирующих шлаков УКП до уровня 15-20 % (действующая на многих заводах практика внепечной обработки) создает предпосылки к развитию процессов испарения CaF_2 , фторидов SiF_4 , AlF_3 , что приводит не только к нестабильности состава шлака в течение внепечной обработки [10], но и увеличивает число ионизированных частиц в канале горения дуги, тем самым увеличивая её длину с возможным оплавлением шлакового пояса футеровки ковша. Минимизация содержаний CaF_2 до значений 2-5 % снижает ионную

составляющую удельной электропроводности шлакового расплава системы $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-SiO}_2\text{-CaF}_2$, что позволяет увеличивать выделяемую в шлаке тепловую мощность и, следовательно, скорость нагрева стали.

Таким образом, анализ приведенных данных свидетельствует о том, что наличие CaF_2 в составе рафинировочных шлаков не приводит к образованию фторидсодержащих ассоциатов при температурах сталеплавильного процесса, но повышает жидкотекучесть шлакового расплава при одновременном расширении концентрационных полей существования CaO -содержащих фаз системы $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, что ускоряет ассимиляцию извести расплавом уже на ранних этапах шлакообразования.

Результаты опытно-промышленных плавов колесной стали с изменением режима присадки плавикового шпата

Две опытные плавки электростали марки 2 (ГОСТ 10791-2011) проведены по действующей технологии выплавки металла-полупродукта в печи ДСП-190 с внепечной обработкой 160 т металла на УКП и вакуумированием. Отличие опытных плавов от плавов действующей технологии состояло в присадке плавикового шпата (~1 кг на плавку) в сталеразливочный ковш по ходу выпуска металла-полупродукта из печи, но не после обработки на УКП. Температура металла-полупродукта перед выпуском из печи составляла 1665 °С (базовая плавка) и 1628 и 1633 °С (опытные плавки № 1134865 и № 1134867 соответственно). Количество раскислителей, легирующих, науглероживателя в каждой из плавов было примерно равным (табл. 1).

Масса шлака в ковше на УКП составляла ~3,7 т/т, или 2,3 %. Как было показано выше, при заданной основности шлака его количество оказывает влияние на конечное содержание серы в стали. Химические составы металла-полупродукта перед выпуском из печи и колесной стали на стадиях УКП и при вакуумировании приведены в табл. 2.

Печной шлак перед выпуском металла-полупродукта из печи характеризуется высоким содержанием окислов железа (34,2 % в пересчете на Fe_2O_3). Металл с 0,08 % С и 0,007 % Si перед выпуском из печи характеризовался высоким содержанием растворенного в нем кислорода (0,096 %). Предварительное раскисление металла-полупродукта алюминием в количестве 0,9 кг/т в печи ДСП 190 перед выпуском обеспечило снижение окисленности металла и высокую степень усвоения элементов при легировании металла в ковше перед обработкой на УКП: угар кремния и марганца составил 10 и 5 % соответственно.

Введенный в ковш на УКП алюминий в количестве 45 кг (0,3 кг/т) практически полностью израсходован на раскисление шлака, что подтверждается возрастанием содержания Al_2O_3 в шлаке по ходу обработки металла на УКП (табл. 3).

Необходимо отметить, что в требованиях межгосударственного стандарта ГОСТ 10971-2011 не регламентируется содержание Al в колесном металле, вместе с тем использование алюминия в практике конечного раскисления стали крайне ограничено из-за вероятности появления в металле строчечных включений корунда, инициирующих развитие усталостных трещин вследствие знакопеременной циклической нагрузки при эксплуатации железнодорожных колес.

Таблица 1

Сводные данные расхода раскислителей, легирующих, науглероживателя и шлакообразующих материалов при выплавке металла-полупродукта в печи ДСП-190 и на стадиях внепечной обработки колесной стали марки 2 по ГОСТ 10791-2011

Номер плавки	Место отбора проб	Материалы присадок на плавку 160 т, кг								t, °С
		MnC17	FC65	Al	Углер.	Известь	Долом.	Засыпка эркера	Плав. шпат	
1134863 базовая	Печь	–	–	150	–	–	–	–	–	1665
	Ковш	1300	600	45	705	900	102	120 из печи	–	–
	УКП	ФМн78 139	55	–	150	800	–	–	–	–
1134865 опытная*	Печь	–	–	150	–	–	–	–	–	1628
	Ковш	1305	600	–	702	1200	–	120 из печи	154	–
	УКП	ФМн78 104	–	45	162	162	–	–	–	–
1134867 опытная*	Печь	–	–	150	–	–	–	–	–	1633
	Ковш	1300	599	–	699	1200	–	120 из печи	150	–
	УКП	ФМн78 156	65	45	157	800	–	–	–	1652

*На опытных плавках по окончанию вакуумирования металл раскислялся ферросиликокальцием СК30 из расчета 22 кг/плавка.

Таблица 2

Химический состав металла-полупродукта перед выпуском его из печи ДСП-190, колесной стали опытной плавки № 1134865 при обработке на УКП и вакууматоре (проба 1 – до начала, 2 – после обработки стали)

Стадия технологии	Номер пробы	Массовая доля элементов, %								
		C	Si	Mn	P	S	Al _{общ}		Ca	Cr
							Al _{раств.}	Al _{окис.}		
Печь перед выпус.	1	0,08	0,007	0,071	0,007	0,048	-		0,0036	Не опр.
							-	-		
УКП	1	0,47	0,366	0,698	0,014	0,026	0,0190		0,0010	0,088
							0,017	0,002		
	2	0,585	0,346	0,745	0,015	0,004	0,0100		0,0070	0,089
							0,009	0,0016		
ВАК	1	0,583	0,350	0,747	0,015	0,004	0,009		0,0014	0,088
							0,008	0,001		
	2	0,581	0,337	0,729	0,014	0,002	0,008		0,0012	0,089
							0,007	0,001		
МНЛЗ-2	1	0,581	0,347	0,726	0,014	0,0020	0,007		0,007	0,089
							Не опр.	Не опр.		

Таблица 3

Изменение химсостава шлака при рафинировании на УКП колесной стали

Проба шлака	Массовая доля компонента, %									Вес шлака, т
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO	S	CaF ₂	
Начало обработки	50,0	18,0	18,0	8,0	0,50	0,30	0,20	1,09	2,3	–
В конце обработки	46,47	11,50	32,20	14,87	0,07	1,58	0,34	1,73	1,9	3,73

После выпуска металла-полупродукта в сталеразливочный ковш содержание серы в металле плавки № 1134865 снизилось от 0,048 до 0,026 % перед установкой ковша на УКП, а после окончания обработки – до 0,004 %. При обработке стали в вакууматоре под шлаком УКП содержание серы снизилось с 0,004 до 0,002 %.

Степень десульфурации (η_s) на указанных стадиях технологии составила: 45,8 % (печь – приемный ковш); 84,6 % (обработка на УКП); 50 % (вакуумирование). Итоговый показатель степени десульфурации металла с измененным режимом

присадки плавикового шпата на указанной плавке был равен 95,8 %, что соответствует показателям действующей технологии.

Содержание CaF₂ в рафинировочных шлаках внепечной обработки при проведении опытных плавов составило 3 %. В результате изменения режима присадок плавикового шпата, несмотря на увеличение массы рафинировочного шлака на УКП на 37 % в сравнении с показателями действующей технологии, достигнуто снижение на 34 % удельного расхода электроэнергии на стадии УКП с 43,7 до 28,7 кВт ч/т (табл. 4).

Таблица 4

Технологические показатели этапов внепечной обработки колесной стали марки 2 на УКП

Этапы внепечной обработки						Итоговые показатели этапов А и Б			Вес шлака, т
Формирование шлака (А)			Легирование металла (Б)			Длительность, мин:с	Длительность работы под током	Расход электро- энергии, кВт ч	
Длительность, мин:с		Расход электро- энергии	Длительность, мин:с		Расход электро- энергии				
Этап А	Работа под током		Этап Б	Работа под током					
<u>Действующая технология, плавка № 1134863</u>									
25:03	10:07	3430	29:00	10:14	3620	54:02	20:21	7050	2,71
<u>Опытная плавка № 1134865</u>									
5:06	3:09	1140	40:24	10:59	3520	47:49	14:08	4660	3,73
<u>Опытная плавка № 1134867</u>									
8:56	3:00	1060	46:41	13:06	3460	55:37	16:06	4520	3,76

Как следует из данных табл. 4, значительный вклад в снижение энергетических затрат создается на стадии формирования шлака, что приводит к снижению общей длительности работы У КП под током.

Достигнутое снижение удельного расхода электроэнергии объясняется формированием гомогенного шлака уже на стадии выпуска металла-продукта из печи за счет присадки плавикового шпата, обеспечивающего растворение и ассимиляцию извести шлаковым расплавом системы $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-SiO}_2\text{-CaF}_2$.

Выводы

1. Проанализирована структура сквозной технологической схемы производства колесной стали в условиях электросталеплавильного завода МЗ «Днепросталь», акцентировано внимание на основных положениях технологий на каждой из стадий: выплавка металла-полупродукта в печи ДСП-190, раскисление, легирование и науглероживание металла в сталеразливочном ковше, присадки шлакообразующих и формирование первичного ковшевого шлака с последующей обработкой металла на У КП и вакуумированием.

2. Изложены физико-химические предпосылки рационального режима присадок твердых материалов в ковш и обсуждены вопросы формирования оксидно-фторидного шлакового расплава, проанализированы диаграммы плавкости бинарных систем CaO-CaF_2 , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$. Отмечено, что в составе основного шлака содержание CaF_2 не влияет на термодинамические условия протекания реакции десульфурации, но определяет физико-химические характеристики оксидно-фторидного расплава и кинетику массообменных процессов в системе «металл-шлак».

3. Проанализирована тернарная оксидно-фторидкальциевая система $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ с 10% CaF_2 и установлено, что наличие плавикового шпата на стадии формирования в сталеразливочном ковше шлака из присаживаемых твердых материалов обеспечивает ассимиляцию извести и тем самым повышенную десульфурующую способность шлака и снижение расхода электроэнергии на стадии обработки металла на У КП.

4. Проведены опытно-промышленные плавки колесной стали и исследованы процессы шлакообразования при введении фракционированной извести присадки в сочетании с плавиковым шпатом в сталеразливочный ковш по ходу выпуска металла-полупродукта массой 160 т из печи ДСП-190.

5. Выявлено, что измененный режим обработки металла-полупродукта твердыми материалами в ковше с применением плавикового шпата в количестве ~1 кг/т способствует ускоренной ассимиляции извести и раннему формированию

гомогенного шлака перед установкой ковша на стенд У КП, проведению активного процесса десульфурации при снижении на 30-35 % удельного расхода электроэнергии на стадии У КП.

Библиографический список / References

1. Есаулов Г. А. Исследование методом РСМА состава и природы гетерофазных неметаллических включений в цельнокатаных железнодорожных колесах из непрерывнолитых заготовок / Г. А. Есаулов, Ю. В. Климчик, М. И. Гасик, А. П. Горобец // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. – № 4. – С. 20-28.

Esaulov G. A., Klimchik Yu. V., Gasik M. I., Gorobets A. P. The study by the RSMA method of the composition and nature of heterophase nonmetallic inclusions in solid-rolled railway wheels from continuously cast billets. *Metallurgical and mining industry*, 2013, no. 4, pp. 20-28.

2. Кравченко Ю. С. Проект электросталеплавильного комплекса ООО «Металлургический завод «Днепросталь» / Ю. С. Кравченко, В. Н. Ерак, А. А. Малик и др. // *Электрметаллургия*. – 2008. – № 1. – С. 38-44.

Kravchenko Yu. S., Erak V. N., Malik A. A. Project of electric steel-making complex of Dneprostal Metallurgical Plant LLC. *Electrometallurgy*, 2008, no. 1, pp. 38-44.

3. Будников П. П., Тресвятский С. Г. ДАН СССР. – 1953. – Т. 89, № 3. – С. 479-482.

Budnikov P. P., Tresvyatsky S. G. RAS USSR, 1953, vol. 89, no. 3, pp. 479-482.

4. Эйтель В. Физическая химия силикатов / В. Эйтель. – М.: Ин. лит-ра, 1962. – 1055 с.

Eytel V. Physical chemistry of silicates. Moscow, Ying. liter, 1962, 1055 p.

5. Торопов Н. И. Высокотемпературная химия силикатных и других окисных систем / Н. И. Торопов, В. П. Барзаковский // *Изв. АН СССР*. – М.; Л., 1963. – 258 с.

Toropov N. I., Barzakovsky V. P. High-temperature chemistry of silicate and other oxide systems. *Izv. Academy of Sciences of the USSR, Moscow, Leningrad*, 1963, 258 p.

6. Зайцев А. И. Термодинамические свойства и фазовые равновесия в системе $\text{CaF}_2\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$. II. Модельное описание термодинамических свойства расплавов системы $\text{CaF}_2\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ / А. И. Зайцев, А. Д. Литвина, Б. М. Могутнов // *Неорганические материалы*. – 1998. – Т. 34, № 1. – С. 80-88.

Zaitsev A. I., Litvina A. D., Mogutnov B. M. Thermodynamic properties and phase equilibria in the system $\text{CaF}_2\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$. II. Model description of the thermodynamic properties of melts of the $\text{CaF}_2\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ system. *Inorganic materials*, 1998, vol. 34, no. 1, pp. 80-88.

7. Зайцев А. И. Жидкие шлаки как ассоциированные растворы / А. И. Зайцев, Б. М. Могутов // Фундаментальные исследования физикохимии металлических расплавов. – М.: Академкнига, 2002. – 469 с.

Zaitsev A. I., Mogutnov B. M. Liquid slags as associated solutions. Fundamental studies of the physicochemistry of metallic melts. Moscow, Academkniga, 2002, 469 p.

8. Чуйко Н.М. Новая технология выплавки шарикоподшипниковой стали марки ШХ15 под белым шлаком / Н. М. Чуйко, В. Б. Рутковский // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1960. – № 6. – С. 14–16.

Chuyko N. M., Rutkovsky V. B. New technology of smelting ball bearing steel ShH15 under white slag. News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy, 1960, no. 6, pp. 14–16.

9. Чуйко Н. М. Теория и технология электроплавки стали / Н. М. Чуйко, А. Н. Чуйко. – Киев; Донецк: Головное издательство, 1983. – 248 с.

Chuyko N. M., Chuyko A. N. Theory and technology of electric steel melting. Kiev; Donetsk: Leading publishing house, 1983, 248 p.

10. Анализ устойчивости оксидно-фторидных расплавов при рафинирующих обработках стали электрометаллургическими процессами / М. И. Гасик, М. М. Гасик, А. П. Горобец, О. И. Поляков, Ю. С. Пройдак, А. И. Панченко, А. С. Сальников // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2011. – № 5. – С. 20–29.

Gasik M. I., Gasik M. M., Gorobets A. P., Polyakov O. I., Proydak Yu. S., Panchenko A. I., Salnikov A. S. Analysis of the stability of oxide-fluoride melts in refining steel treatments by electrometallurgical processes. Metallurgical and mining industry, 2011, no. 5, pp. 20–29.

Мета. Управління режимом формування оксидно-фторидного шлаку на стадії позапічної обробки колісного металу.

Методика. Дослідження енерготехнологічних режимів позапічної обробки колісної сталі виконувалися методом аналізу показників базової технології обробки металу на установці ківш-піч.

Результати. Встановлено оптимальний режим введення плавикового шпату при формуванні ковшового шлаку на установці ківш-піч.

Наукова новизна. Аналітичними дослідженнями підтверджено відсутність у складі оксидно-фторидного шлаку структур, що містять плавиковий шпат. Його роль при формуванні ковшового шлаку визначається як деполімеризатора просторових кремній-оксидних угруповань і, як наслідок, підвищення рідинотекучості розплаву при одночасному підвищенні окислювального потенціалу шлаку.

Практична значущість. Результати проведеного дослідження визначають граничні межі вмісту CaF_2 в складі ковшового шлаку і дозволяють на 30–35 % знизити витрати електроенергії при формуванні шлаку на установці ківш-піч.

Ключові слова: колісна сталь, дугова електропіч, метал-напівпродукт, розкислювачі, легуючі, шлакоутворюючі матеріали, плавиковий шпат, установка ківш-піч, економія електроенергії.

Purpose. Management of the formation of oxide fluoride slag at the stage of out-furnace treatment of the wheel metal.

Methodology. Investigations of the energy technological regimes of out-of-furnace treatment of wheel steel were performed by analyzing the parameters of the basic metal processing technology at the ladle furnace.

Results. The optimal input mode of the fluorspar is established when the ladle slag is formed at the ladle furnace installation.

Scientific novelty. Analytical studies confirmed the absence in the structure of oxide fluoride slag structures containing fluorspar. Its role in the formation of ladle slag is defined as a depolymerization unit of spatial silica-oxygen groups and, as a consequence, an increase in the flowability of the melt while simultaneously increasing the oxidative potential of the slag.

Practical significance. The results of the study determine the limits of the CaF_2 content in the ladle slag and allow a 30–35% reduction in the power consumption during slag formation at the ladle furnace.

Key words: wheeled steel, electric arc furnace, metal intermediate, deoxidizing agents, alloying, slag-forming materials, fluorspar, ladle-furnace installation, energy saving.

Рекомендована к публикации
к. т. н. В. П. Пиптюком

Поступила 25.02.2019