



УДК 669.187;669.187.5;669.187.28

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФТОРИДА КАЛЬЦИЯ НА ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОБРАБОТКИ КОЛЕСНОЙ СТАЛИ НА УСТАНОВКЕ КОВШ–ПЕЧЬ

Г. А. Есаулов<sup>1</sup>, М. И. Гасик<sup>2</sup>, А. П. Горобец<sup>2</sup>, Ю. В. Климчик<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Металлургический завод «Днепросталь».

49081, г. Днепропетровск, ул. Столетова, 21. E-mail: officeyesaulov@ips.interpipe.biz

<sup>2</sup>Национальная металлургическая академия Украины.

49600, г. Днепропетровск, просп. Гагарина, 4. E-mail: tehnosplavy@ua.fm

Изложены физико-химические предпосылки рационального режима присадок твердых шлакообразующих материалов в ковш и обсуждены вопросы формирования оксидно-фторидного шлакового расплава, проанализированы диаграммы плавкости бинарной системы CaO–CaF<sub>2</sub>, тернарной оксидно-фториднокальциевой системы CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> с 10 % CaF<sub>2</sub>. Отмечено, что в составе основного шлака содержание CaF<sub>2</sub> не влияет на термодинамические условия образования ассоциатов, но определяет физико-химические характеристики оксиднофторидного расплава и кинетику массообменных процессов в системе металл–шлак. Установлено, что наличие плавикового шпата на стадии формирования шлака из присаживаемых твердых материалов ускоряет ассимиляцию извести шлаковым расплавом и тем самым обеспечивает повышенную десульфурную способность шлака. Приведены результаты опытно-промышленного применения плавикового шпата при внепечной обработке колесной стали Ст2 (ГОСТ 10791–2011) на установке ковш–печь (УКП). В соответствии с программой исследования присадку плавикового шпата производили в сталеразливочный ковш в ходе выпуска 160 т металла–полупродукта из печи ДСП-190. Научно обоснованное управление режимом формирования рафинировочного шлака присадками плавикового шпата позволяет на стадии УКП на 30...35 % сократить расход электроэнергии при обеспечении высокого качества непрерывнолитой заготовки для производства цельнокатаных железнодорожных колес. Библиогр. 10, табл. 4, ил. 3.

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

**Актуальность работы. Постановка задачи исследования и основные положения действующей технологии выплавки электростали.** 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 металлургического завода «Днепросталь» включает следующие стадии: выплавку металла–полупродукта в дуговой электропечи ДСП-190 с эркерным выпуском 160 т металла в сталеразливочный ковш, присадку по ходу наполнения ковша раскислителей, легирующих, науглероживателя и шлакообразующих материалов. На последующих стадиях колес-

ная сталь подвергается обработке в установке ковш–печь (УКП) для десульфурации и раскисления с дальнейшей передачей ковша на вакуумирование и окончательного раскисления. Непрерывная разливка стали производится на четырехручьевого МНЛЗ радиального типа с получением заготовок колесной стали диаметром 450 мм [1].

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

По ныне действующей технологии расход присаживаемых в ковш материалов по ходу выпуска металла–полупродукта из печи в ковш составляет в среднем (килограммов на 1 плавку): 1300 MnC17,

600 ФС65, 700 углерода, 45 алюминия, 1200 извести (ранее присаживали обожженный доломит или импортный боксит). При этом в ковш также поступает 120 кг материала (45...47 % MgO, 37...39 % SiO<sub>2</sub>, 9 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) для засыпки выпускного отверстия эркера и 0,1 кг/т стартовой смеси (19 % SiO<sub>2</sub>, 37,5 % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 21,1 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 11,9 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 8 % MgO) для канала шиберного затвора сталеразливочного ковша. Для расплавления указанного количества ферросплавов и шлакообразующих материалов металл-полупродукт перегревается так, чтобы перед выпуском из печи ДСП-190 в ковш его температура составляла 1625...1630 °С.

В результате реакций раскисления металла в ковше алюминием и легирования кремнием в формирующемся шлаке из извести, материалов засыпки эркера и канала шиберного затвора ковша увеличивается содержание Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiO<sub>2</sub>. Однако количество формирующегося на первом этапе шлакового расплава недостаточно для ассимиляции извести шлаком. Поэтому за время выдержки металла в ковше и перед подачей его на УКП часть присаживаемой извести находится в ошлакованном виде.

На УКП производится корректировка химического состава 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 значений температуры 1615...1620 °С перед подачей его на вакуумирование. Расход электроэнергии при обработке металла в ковше-печи равен примерно 7000 кВт·ч на 1 плавку. По проекту предусматривается применение 1,4 кг/т стали (225 кг на плавку 160 т) плавикового шпата [2]. Причем плавиковый шпат должен присаживаться в ковш после обработки колесной стали на УКП, т. е. перед вакуумированием металла. Недостатки этого варианта 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 соп-

ровождается интенсивным выплеском шлака за борт ковша 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 оксиднофторидной системы CaO–CaF<sub>2</sub> (рис. 1).

Приведенные диаграммы плавкости свидетельствуют о существовании при температурах сталеплавильного процесса (≤ 1600 °С) гомогенного шлакового расплава при массовом соотношении CaO/CaF<sub>2</sub>, равном 3:1. Указанное содержание компонентов обеспечивают фазовый состав оксиднофторидного расплава, приближающийся к температурным условиям формирования эвтектики в системе CaO–CaF<sub>2</sub> ( $T_{пл} = 1360$  °С при 80 мол. % CaF<sub>2</sub>).

При сравнении термодинамических характеристик системы CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, используемой в качестве десульфураторной шлаковой системы, и шлакового расплава системы CaO–CaF<sub>2</sub> менее энергоемким для формирования шлаковой рафинирующей системы является применение плавикового шпата с энтальпией плавления  $\Delta H_{пл}$ , равной 30 кДж/моль против 117,15 для Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В результате взаимодействия шлака с огнеупорами футеровки ковша, частичного окисления легирующих базовый состав шлака системы CaO–CaF<sub>2</sub> трансформируется в многокомпонентную оксиднофторидную систему CaO–MgO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>–CaF<sub>2</sub>.

Значения температуры плавления шлаков этой системы могут быть оценены при анализе первичных полей кристаллизации системы CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>–CaF<sub>2</sub> (рис. 2).

Установлено неоднозначное влияние добавок CaF<sub>2</sub> на составы указанной системы – наличие до 1,5 % CaF<sub>2</sub> способствует минералообразованию первичных шлаков, превышение содержания CaF<sub>2</sub> более чем на 5 % не только приводит к снижению температуры на 70...120 °С точек невариантных равновесий, но и смещает поля кристаллизации геленита 2CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SiO<sub>2</sub> к стороне Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–CaF<sub>2</sub> концентрационного треугольника, уменьшает поля устойчивости метасиликата кальция CaO·SiO<sub>2</sub>, ранкинита 3CaO·2SiO<sub>2</sub> и анортита CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub> [5].

В трехкомпонентной системе CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> с 10 % CaF<sub>2</sub> зафиксировано значительное увеличение концентрационного поля существования двух несмешивающихся жидкостей, ограниченного кривой с началом, соответствующим 5 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на стороне Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> и окончанием в точке 27,6 % CaO на стороне CaO–SiO<sub>2</sub> концентрационного треугольника (рис. 2).

Химико-минералогический анализ состава фаз, образующихся как первичные шлаки на начальных этапах кристаллизации расплава, свидетельствуют о том, что CaF<sub>2</sub> не участвует в реакциях минералообразования и проявляет (особенно в высококрем-

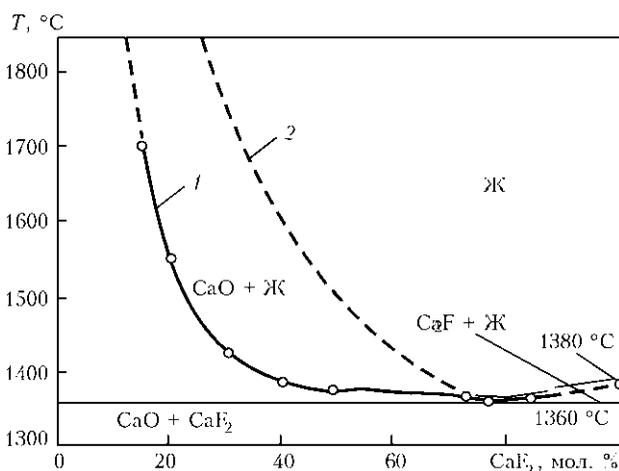


Рис. 1. Диаграммы плавкости системы CaO–CaF<sub>2</sub>: 1 – по Будникову [3]; 2 – по Эйтелю [4]

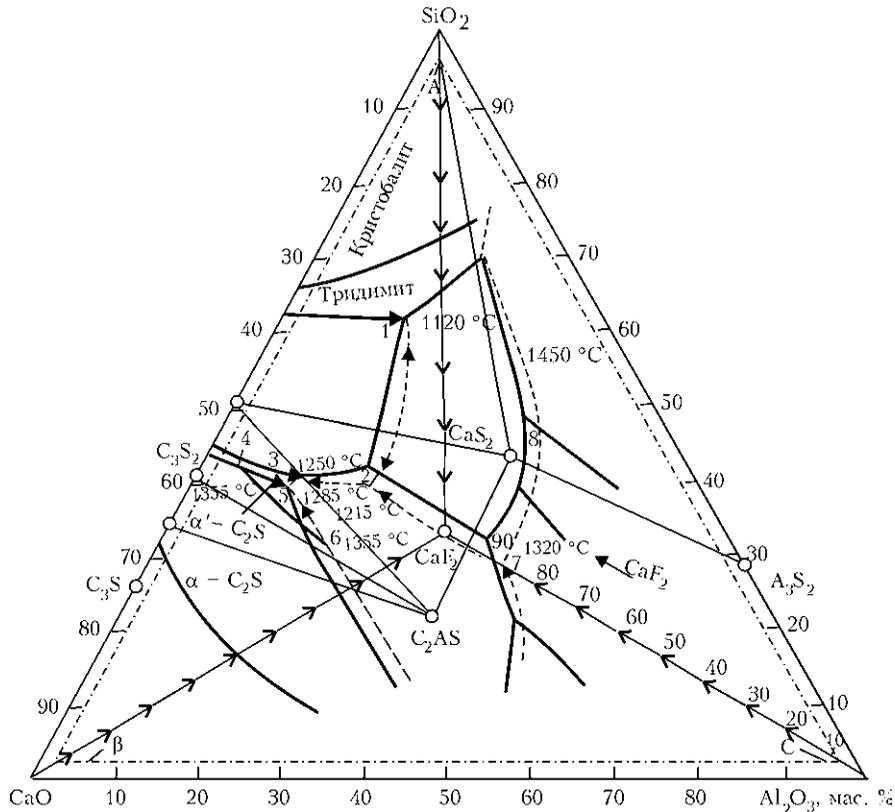
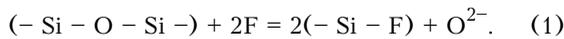


Рис. 2. Фазовые равновесия и температурно концентрационные поля трехкомпонентной системы CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> с 10 % CaF<sub>2</sub> [5]

неземистом расплаве) свойства деполимеризатора, разрывая цепочные структуры Si:O:Si и повышая содержание анионов кислорода в расплаве по следующей схеме:



Очевидно, реакция (1) изменяет не только физические свойства расплава, но и окислительный потенциал шлаковой системы, непосредственно 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 относительной массы шлака.

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

где  $[S_{нач}]$ ,  $[S_{кон}]$  – содержание серы в металле перед и в конце десульфурации;  $\alpha_{[O]}$  – активность кислорода в металле;  $f_S$  – коэффициент активности серы;  $C_S$  – сульфидная емкость шлака;  $m$  – относительная масса шлака на 1 кг стали.

Термодинамическая модель поведения CaF<sub>2</sub> в бинарных и системах более сложного состава дает возможность рассматривать их свойства на основе теории ионных растворов, принимая активность элемента тождественно равной его ионной доле. Развивая теорию строения шлаков как ассоцииро-

ванных растворов, в работе [6] отмечают слабое межчастичное взаимодействие CaF<sub>2</sub> с расплавом системы CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>, исключая тем самым участие CaF<sub>2</sub> в процессе формирования шлаковых расплавов, и аппроксимируют свойства жидких расплавов наличием в их составе комплексов (ассоциатов) CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и сеток SiO<sub>2</sub>. В рамках данной теории предполагается отсутствие таких модельных структур, как фторсодержащие молекулы и комплексы типа Me–F (CaF, SiF). В то же время спектроскопическими исследованиями закристаллизованных составов системы CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–CaF<sub>2</sub> зафиксировано наличие комплексов Al<sub>x</sub>(AlF<sub>6</sub><sup>3-</sup>, AlF<sub>3</sub><sup>2-</sup>), что свидетельствует об участии ионов фтора в деформации кристаллохимических структур Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В системе CaO–CaF<sub>2</sub>, проявляющей положительные отклонения активности  $\alpha_{CaF_2}$  в области повышенных содержаний CaF<sub>2</sub>, происходит межмолекулярное взаимодействие компонентов, что позволяет оценить значение избыточной энергии смешения  $\Delta G^E$  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]:

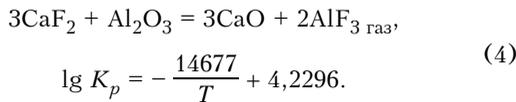
$$\Delta G^E = L_{1x}(\text{CaO})[1 - x(\text{CaO})] + L_2[x(\text{CaO})]^2[1 - x(\text{CaO})]^2, \quad (3)$$

где  $L_i$  параметр, характеризующий температурную зависимость энергии смешения  $\Delta G^E$ ;  $x(\text{CaO})$  –

молярная доля CaO;  $L_1 = RT(3,84 - 0,001087T)$ ;  $L_2 = -RT(11,87 - 0,00472T)$  [Дж].

Анализ зависимости (3) свидетельствует о том, что влияние температуры шлакового расплава на значение энергии смешения компонентов  $\Delta G^E$  незначительно, максимальное значение  $\Delta G^E$  приобретает для составов с высоким содержанием фторида кальция. Так, на заключительных стадиях затвердевания маточного раствора, обогащенного фторидом как наиболее легкоплавким составляющей системы CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-CaF<sub>2</sub>, происходит формирование упорядоченных фазовых структур, содержащих фторидные компоненты 2CaO·SiO<sub>2</sub>·CaF<sub>2</sub> (куспидин), 12CaO·7Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·CaF<sub>2</sub>.

По действующей на предприятиях практике рафинирования металла шлаками состава CaO/CaF<sub>2</sub> = 3/1 при массовой доле CaF<sub>2</sub> в пределах 20...10 % (первое значение — начальное содержание CaF<sub>2</sub>, второе — по ходу обработки металла) фторид кальция повышает количество анионов кислорода в расплаве за счет реакции деполимеризации структур (SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup>) по реакции (1) и повышает основность шлака в ходе протекания следующей реакции:



В работе [8] описаны исследования влияния CaF<sub>2</sub> на активность FeO и содержание кислорода в углеродистой (примерно 1 % C) подшипниковой стали ШХ15. На основе статистической обработки данных промышленных плавов впервые было установлено, что с увеличением массовой доли CaF<sub>2</sub> в печных основных шлаках (от 0,5 до 5 %) повышается концентрация кислорода в стали, мас. %:

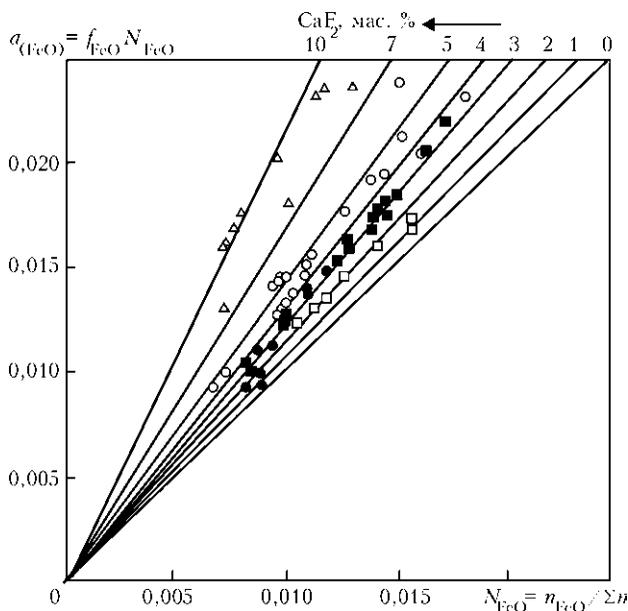


Рис. 3. Влияние фтористого кальция на активность оксида железа  $\alpha(\text{FeO})$  в ковшовых шлаках; числа 0...10 указывают на содержание CaF<sub>2</sub> [8]

(CaF <sub>2</sub> )	[O] <sub>Fe</sub>	Количество плавов
0,5...2,0 1,2	0,0023	46
2,0...4,0 3,0	0,0027	27
>5	0,0031	14

Как объяснено в работе [8], фторид кальция резко снижает растворимость оксидов железа в шлаке, т. е. повышает их активность и тем самым увеличивает содержание растворенного в стали кислорода.

На основании данных приведенных промышленных плавов стали ШХ15 в условиях ПАО ДСС с рафинированием в ковше печными шлаками (без УКП) и различным содержанием CaF<sub>2</sub> установлена эмпирическая зависимость коэффициента активности оксида железа в шлаке  $f_{\text{FeO}}$  от содержания в нем CaF<sub>2</sub> [8]:

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

Зависимость  $\alpha_{\text{FeO}} = f_{\text{FeO}} N'_{\text{FeO}}$  при концентрациях CaF<sub>2</sub> в шлаке от нуля до 10 % приведена на рис. 3, где нанесены экспериментальные значения  $\alpha_{\text{FeO}}$  с учетом  $f_{\text{FeO}}$  для отдельных проб ковшового шлака 70 плавов с разным содержанием CaF<sub>2</sub>. Молярная доля FeO в шлаке ( $N'_{\text{FeO}}$ ) рассчитывается по методу Н. М. Чуйко, основанному на теории строения шлаков как системы с частично диссоциированными молекулами [9].

Из рис. 3 следует, что активность оксида железа шлаков с CaF<sub>2</sub> менее 2,5 % в 1,5...2,0 раза ниже, чем в шлаках с высокой концентрацией CaF<sub>2</sub> (5...10 %). На основании экспериментальных исследований и обработки полученных данных сделаны выводы [8] о том, что не следует злоупотреблять плавиковым шпатом для разжижения шлака, особенно перед выпуском стали, и что шлаки, содержащие фтористый кальций, должны более тщательно раскисляться для достижения содержания FeO менее 0,2 %.

Повышение уровня CaF<sub>2</sub> в составе рафинирующих шлаков УКП до 15...20 % (действующая на многих заводах практика внепечной обработки) создает предпосылки к развитию процессов испарения CaF<sub>2</sub>, фторидов SiF<sub>4</sub>, AlF<sub>3</sub>, что приводит не только к нестабильности состава шлака в течение внепечной обработки [10], но и повышает количество ионизированных частиц в канале горения дуги, тем самым увеличивая ее длину с возможным оплавлением шлакового пояса футеровки ковша. Минимизация содержания CaF<sub>2</sub> до 2...5 % снижает ионную составляющую удельной электропроводности шлакового расплава системы CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-SiO<sub>2</sub>-CaF<sub>2</sub>, что позволяет увеличивать выделяемую в шлаке тепловую мощность и, следовательно, скорость нагрева стали.

Таким образом, анализ приведенных данных свидетельствует о том, что наличие CaF<sub>2</sub> в составе



рафинирующих шлаков не приводит к образованию фторидсодержащих ассоциатов при температуре сталеплавильного процесса, но повышает жидкотекучесть шлакового расплава при одновременном расширении концентрационных полей существования СаО-содержащих фаз системы СаО–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>, что ускоряет ассимиляцию извести расплавом уже на ранних этапах шлакообразования.

**Результаты опытно-промышленных плавков колесной стали с изменением режима присадки плавикового шпата.** Две опытные плавки электростали Ст2 (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 плавков от плавков действующей технологии состояло в присадке плавикового шпата (около 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 (базовая плавка), 1628 и 1633 °С (опытные плавки соответственно № 1134865 и № 1134867. Количество раскислителей, легирующих, науглероживателя в каждой из плавков было примерно равным (табл. 1).

Масса шлака в ковше на УКП составляла приблизительно 3,7 т или 2,3 %. 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 оксидов железа (34,2 % в пересчете на Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Металл с 0,08 % С и 0,007 % Si перед выпуском из печи отличался высоким содержанием растворенного в нем кислорода (0,096 %). Предварительное раскисление металла–полупродукта алюминием в количестве 0,9 кг на 1 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 соответственно 10 и 5 %.

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<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в шлаке по ходу обработки металла на УКП (табл. 3).

Необходимо отметить, что в требованиях межгосударственного стандарта ГОСТ 10971–2011 не регламентируется содержание алюминия 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.

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 вакуума-

**Таблица 1. Расход раскислителей, легирующих, науглероживателя и шлакообразующих материалов при выплавке металла–полупродукта в печи ДСП-190 и на стадиях внепечной обработки колесной стали Ст2 по ГОСТ 10791–2011**

Номер плавки	Место отбора проб	Материалы присадок на плавку 160 т, кг								T, °C
		MnC17	ФС65	Al	C	Известь	Доломит	Засыпка эркера	Плавленный шпат	
1134863 (базовая)	Печь	–	–	150	–	–	–	–	–	1665
	Ковш	1300	600	45	705	900	102	120	–	–
	УКП	ФMн78 139	55	–	150	800	–	–	–	–
1134865 (опытная)*	Печь	–	–	150	–	–	–	–	–	1628
	Ковш	1305	600	–	702	1200	–	120	154	–
	УКП	ФMн78 104	–	45	162	162	–	–	–	–
1134867 (опытная)*	Печь	–	–	150	–	–	–	–	–	1633
	Ковш	1300	599	–	699	1200	–	120	150	–
	УКП	ФMн78 156	65	45	157	800	–	–	–	1652

\* На опытных плавках по окончании вакуумирования металл раскисляли ферросиликокальцием СК30 из расчета 22 кг на 1 плавку.



**Таблица 2.** Химические составы 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 <sub>общ</sub>		Ca	Cr
							Al <sub>раств</sub>	Al <sub>окис</sub>		
Печь перед выпуском	1	0,08	0,007	0,071	0,007	0,048	–	–	0,0036	Не определяли
	УКП	1	0,47	0,366	0,698	0,014	0,026	0,0190	0,0010	0,088
Вакууматор	1	0,585	0,346	0,745	0,015	0,004	0,017	0,002	0,0070	0,089
							0,009	0,0016		
	2	0,583	0,350	0,747	0,015	0,004	0,008	0,001	0,0014	0,088
							0,008	0,001		
МНЛЗ-2	1	0,581	0,337	0,729	0,014	0,002	0,007	0,001	0,0012	0,089
							0,007	0,001		
Не определяли										–

торе под шлаком УКП содержание серы снизилось от 0,004 до 0,002 %.

Степень десульфурации  $\eta_S$  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 равнялся 95,8 %, что соответствует показателям действующей технологии.

Содержание CaF<sub>2</sub> в рафинировочных шлаках внепечной обработки при проведении опытных пла-

вок 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 от 43,7 до 28,7 кВт·ч/т (табл. 4).

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

**Таблица 3.** Изменение химического состава шлака при рафинировании на УКП колесной стали

Проба шлака при обработке	Массовая доля компонента, %									Масса шлака, т
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	S	CaF <sub>2</sub>	
Начало	50,0	18,0	18,0	8,0	0,50	0,30	0,20	1,09	2,3	–
Конец	46,47	11,50	32,20	14,87	0,07	1,58	0,34	1,73	1,9	3,73

**Таблица 4.** Технологические показатели этапов внепечной обработки колесной стали Ст2 на УКП

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



Достигнутое снижение удельного расхода электроэнергии объясняется формированием гомогенного шлака уже на стадии выпуска металла-полупродукта 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 «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 УКП 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  $\text{CaO-CaF}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ . Отмечено, что в составе основного шлака содержание  $\text{CaF}_2$  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 %  $\text{CaF}_2$ , установлено, что наличие плавикового шпата на стадии формирования в сталеразливочном ковше шлака из присаживаемых твердых материалов обеспечивает ассимиляцию извести и тем самым повышает десульфурующую способность шлака.

4. Проведены опытно-промышленные плавки колесной стали и исследованы процессы шлакообразования при введении фракционированной извести-

ти-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 примерно 1 кг/т плавикового шпата способствует ускоренной ассимиляции извести и раннему формированию гомогенного шлака перед установкой ковша на стенд УКП, проведению активного процесса десульфурации при снижении на 30...35 % удельного расхода электроэнергии на стадии УКП.

1. *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 // *Металлург. и горноруд. пром-сть.* — 2013. — № 4. — С. 20–28.
2. *Проект электросталеплавильного комплекса* ООО *Металлургический завод «Днепросталь»* / Ю. С. Кравченко, В. Н. Ерак, А. А. Малик и др. // *Электрометаллургия.* — 2008. — № 1. — С. 38–44.
3. *Будников П. П., Тресветский С. Г.* Диаграмма плавкости системы  $\text{CaO-CaF}_2$  // *ДАН СССР.* — 1953. — 89, № 3. — С. 479–482.
4. *Эйтель В.* *Физическая химия силикатов.* — М.: *Иностр. лит-ра,* 1962. — 1055 с.
5. *Торопов Н. И., Барзаковский В. П.* *Высокотемпературная химия силикатных и других оксидных систем* // *Изв. АН СССР, М.; Л.;* 1963. — С. 258.
6. *Зайцев А. И., Литвина А. Д., Могутнов Б. М.* *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 свойств расплавов системы  $\text{CaF}_2\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$*  // *Неорганические материалы.* — 1998. — 34, № 1. — С. 80–88.
7. *Зайцев А. И., Могутнов Б. М.* *Жидкие шлаки как ассоциированные растворы* // *Фундаментальные исследования физикохимии металлических расплавов.* — М.: *ИКЦ «Академкнига»,* 2002. — 469 с.
8. *Чуйко Н. М., Рутковский В. Б.* *Новая технология выплавки шарикоподшипниковой стали марки ШХ15 под белым шлаком* // *Изв. высш. учеб. заведений. Черная металлургия.* — 1960. — № 6. — С. 14–16.
9. *Чуйко Н. М., Чуйко А. Н.* *Теория и технология электроплавки стали.* — Киев; Донецк: *Головное изд-во,* 1983. — 248 с.
10. *Анализ устойчивости оксидно-фторидных расплавов при рафинирующих обработках стали электрометаллургическими процессами* / М. И. Гасик, М. М. Гасик, А. П. Горобец и др. // *Металлург. и горноруд. пром-сть.* — 2011. — № 5. — С. 20–29.

Described are the physical-chemical premises of use of rational condition of fillers of hard slag-forming materials into ladle and problems of formation of oxide-fluoride slag melt are discussed, the diagrams of meltability of binary system  $\text{CaO-CaF}_2$ , ternary oxide-fluoride-calcium system  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  with 10 %  $\text{CaF}_2$  were analyzed. It was noted that content of  $\text{CaF}_2$  in the composition of basic slag does not influence the thermodynamic conditions of formation of associates, but defines the chemical characteristics of oxide-fluoride melt and kinetics of mass-exchange processes in metal-slag system. It was found that the presence of fluorspar at the stage of slag formation from filler hard materials accelerates the assimilation of lime by slag melt and, thus, provides the increased desulfuration ability of slag. Results of pilot-industrial application of fluorspar in ladle treatment of wheel steel St2 (GOST 10791–2011) in ladle-furnace installation (LFI) are given. In accordance with the program of investigation the filler of fluorspar was added into steel-pouring ladle during yield of 160 t of metal-semi-product from furnace DSP-190. The scientifically-grounded control of condition of formation of refining slag by fillers of fluorspar allows 30...35 % reducing the power consumption at the stage of LFI and providing the high quality of continuously-cast billet for manufacture of all-rolled railway wheels. Ref. 10, Tables 4, Figures 3.

**Key words:** wheel steel; arc electric furnace; metal-semi-product; deoxidizers; alloying elements; slag-forming materials; fluorspar; ladle-furnace installation; saving of electric power

Поступила 02.12.2013