

УДК 621.745.45:669.187.25:669.582.2:669.721

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПЛАВКИ СТАЛЬНОГО ПОЛУПРОДУКТА В КОНВЕРТЕРАХ И ДСП ПОД МАГНЕЗИАЛЬНЫМИ ШЛАКАМИ*

*Бабенко А.А.¹, д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории пирометаллургии
цветных металлов (babenko@gmail.com)*

Смирнов Л.А.^{1,2}, академик РАН, д.т.н., главный научный сотрудник (sekretar@uim-stavan.ru)

Протопопов Е.В.³, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов (protopopov@sibsiu.ru)

Михайлова Л.Ю.¹, к.т.н., научный сотрудник (ferrosta1@bk.ru)

¹ Институт металлургии УрО РАН

(620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

² ОАО «Уральский институт металлов»

(620062, Россия, Екатеринбург, ул. Гагарина, 14)

³ Сибирский государственный индустриальный университет

(654007, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. В основу разработки рационального состава основных магнезиальных шлаков и технологических приемов их формирования по периодам продувки конвертерной ванны и периодам плавки в дуговой сталеплавильной печи положены результаты фундаментальных исследований физико-химических свойств шлаков. Реализация в конвертерном цехе ОАО «ЕВРАЗ НТМК» разработанного комплекса технологических приемов формирования в основное время продувки магнезиальных шлаков, обладающих низким агрессивным воздействием на футеровку конвертеров, с сохранением высоких рафинирующих свойств и износоустойчивого гарнисажа на базе магнезиальных конечных шлаков обеспечила рекордную стойкость футеровки конвертеров. Стойкость футеровки конвертеров превышает 7000 плавков, при этом сохраняются высокие технологические и технико-экономические показатели процесса. В работе по переделу низкомарганцовистых чугунов в 350-т большегрузных конвертерах АО «ЕВРАЗ ЗСМК» под магнезиальными шлаками изучены особенности шлакообразования и изменения химического состава шлака по периодам продувки конвертерной ванны. При переделе фосфористых чугунов в 300-т кислородных конвертерах на АО «АрселорМиттал Темиртау» разработан комплекс технологических приемов формирования магнезиальных шлаков рекомендованного химического состава по периодам продувки фосфористых чугунов и износоустойчивого гарнисажа на базе конечных магнезиальных шлаков умеренной основности. Реализация разработанных технологических приемов обеспечила стойкость футеровки кислородных конвертеров более 5000 плавков с сохранением высоких технологических и технико-экономических показателей фосфористого передела. В ЭСПЦ ПАО «Северский трубный завод» разработана технология формирования по периодам плавки ДСП-135 магнезиальных шлаков рационального состава. Внедрение технологии обеспечило рекордную стойкость огнеупорной футеровки печи более 1900 плавков за кампанию и высокий уровень технологических и технико-экономических показателей процесса.

Ключевые слова: конвертер, дуговая сталеплавильная печь, стойкость футеровки, магнезиальные шлаки, раздув шлака, вспенивание шлака, вязкость, химический состав, фазовый состав.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-491-498

ВВЕДЕНИЕ

Интенсификация технологических операций в конвертерах и в современных дуговых сталеплавильных печах (ДСП) ужесточает требования к эксплуатации огнеупорной футеровки сталеплавильных агрегатов. Стоимость огнеупорной футеровки, затраты на ее монтаж и ремонт составляют значительную часть в себестоимости стали, поэтому увеличение ресурса службы футеровки агрегатов является актуальной задачей. Решение этой задачи направлено на повышение

производительности и улучшение тепловой работы сталеплавильных агрегатов, снижение себестоимости, улучшение качества металлопродукции.

В последние годы в сталеплавильном производстве широкое распространение получила технология выплавки стального полупродукта в кислородных конвертерах и ДСП под магнезиальными шлаками. Формирование магнезиальных шлаков в процессе рафинирования металлического расплава в конвертерах и формирование защитного покрытия (гарнисажа) на огнеупорной футеровке обеспечивают увеличение производительности сталеплавильных агрегатов и снижение энерго- и материалоемкости процесса за счет повышения стойкости огнеупорной футеровки [1 – 11]. Использование технологии выплавки стального полупродукта в ДСП под магнезиальными шлаками обес-

* В работе принимали участие С.А. Ремиго, В.В. Левчук, А.А. Добромиллов, Х.Ш. Кутдусова, К.Н. Демидов, Т.В. Борисова, А.В. Мурзин, М.В. Ушаков.

Работа выполнена по Государственному заданию ИМЕТ УрО РАН.

печивает повышение эффективности использования электрической энергии и стойкости футеровки печи за счет раннего формирования устойчивой шлаковой пены и снижения агрессивности воздействия шлака на огнеупорную футеровку [11 – 17]. Например, по данным авторов работы [12] вспенивание шлака по периодам плавки в ДСП снижает расход электроэнергии на 5 – 10 %, а расход огнеупоров – на 25 – 65 %.

В настоящей работе приведены результаты разработки и внедрения технологии выплавки стального полупродукта под магнезиальными шлаками рационального состава, формируемыми по периодам продувки углеродистого полупродукта (ванадиевый передел), низкомарганцовистого и фосфористого чугунов в кислородных конвертерах и по периодам плавки в современных ДСП.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫПЛАВКИ СТАЛЬНОГО ПОЛУПРОДУКТА В КОНВЕРТЕРАХ И ДСП ПОД МАГНЕЗИАЛЬНЫМИ ШЛАКАМИ

Перспективным направлением повышения эффективности технологии выплавки стального полупродукта в кислородных конвертерах и современных ДСП является работа сталеплавильных агрегатов под магнезиальными шлаками [1 – 9, 11 – 14]. Однако практика показывает, что смещение химического состава магнезиальных шлаков в область пересыщения MgO зачастую сопровождается ухудшением рафинирующих свойств шлаков и, соответственно, технико-экономических показателей процесса [6, 7, 15]. Формирование магнезиальных шлаков рационального состава, обеспечивающего формирование устойчивой шлаковой пены, низкое агрессивное воздействие на огнеупорную футеровку с сохранением высоких рафинирующих свойств, является актуальной задачей, для решения которой был выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований [18 – 21]:

- численное моделирование влияния температуры и химического состава шлака на концентрацию насыщения оксидом магния;

- исследование термодинамики и макрокинетики процесса дефосфорации металла под магнезиальными шлаками с различной степенью насыщения оксидом магния;

- изучение вязкости магнезиальных шлаков в области насыщения MgO и ее роль в эффективности формирования устойчивой шлаковой пены;

- изучение влияния химического и фазового состава конечных магнезиальных шлаков на особенности формирования на поверхности огнеупорной футеровки защитного слоя (гарнисажа);

- анализ влияния химического состава шлаков окислительного периода плавки в ДСП на уровень вспенивания шлака и отдельные технико-экономические показатели процесса.

Результаты выполненных фундаментальных исследований были положены в основу разработки рационального состава магнезиальных шлаков и технологических приемов их формирования по периодам продувки конвертерной ванны и по периодам плавки в ДСП.

ВЫПЛАВКА СТАЛЬНОГО ВАНАДИЕВОГО ПОЛУПРОДУКТА В 160-Т КИСЛОРОДНЫХ КОНВЕРТЕРАХ ПОД МАГНЕЗИАЛЬНЫМИ ШЛАКАМИ

Выплавку стали в 160-т конвертерах ОАО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат» (ОАО «ЕВРАЗ НТМК») осуществляют из углеродистого полупродукта при комбинированной продувке с верхней подачей кислорода интенсивностью 450 – 500 м³/мин и инертного газа через донные фурмы с расходом 0,2 – 1,7 м³/мин. Углеродистый полупродукт, получаемый в процессе деванадации чугуна, представляет собой железоуглеродистый расплав (температура 1340 – 1400 °С), содержащий 2,8 – 3,5 % С, менее 0,01 % Si; 0,01 – 0,04 % Mn; 0,02 – 0,08 % V; менее 0,01 % Ti; 0,04 – 0,10 % P; 0,02 – 0,04 % S (по массе).

Принятые на момент проведения исследований в конвертерном цехе комбината расход и режим присадки извести, обожженной кремнийсодержащей добавки (ОКД), марганцевого агломерата и магнезиальных материалов обеспечивали формирование на протяжении всего периода продувки ванны конвертера основных высокомагнезиальных шлаков в области значительного пересыщения MgO. Формирование таких шлаков сопровождалось снижением рафинирующих свойств и не обеспечивало стойкость футеровки конвертеров более 3500 плавов.

Результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований [18] были использованы для разработки рационального состава магнезиальных шлаков и технологических приемов их формирования по периодам продувки конвертерной ванны. Для формирования шлаков с низким агрессивным воздействием на огнеупорную футеровку конвертеров и сохранения высоких рафинирующих свойств было рекомендовано в начальный период продувки в диапазоне температур расплава 1350 – 1400 °С и основности шлака 2,0 – 3,0 концентрацию оксида магния в шлаке поддерживать на уровне 6,0 – 7,8 %, в середине продувки – в диапазоне температур 1500 – 1550 °С и основности 3,0 – 4,0 на уровне 6,5 – 8,0 %, в конце продувки – в диапазоне температур 1650 – 1700 °С и основности 3,0 – 4,0 на уровне 8,0 – 9,5 %.

Результаты исследований вещественного состава конечных магнезиальных шлаков [18] показали, что одним из важнейших технологических параметров формирования на поверхности огнеупорной футеровки износостойчивого гарнисажа является основность

шлака. Магнезиальные шлаки основностью не более 3,8 – 4,0, сохраняя высокие рафинирующие свойства, обеспечивают рациональное соотношение высоко- и низкотемпературных ферритных фаз при высокой концентрации высокотемпературной силикатной фазы. Гарнисаж, сформированный на базе таких шлаков, характеризуется повышенной износостойчивостью, достигающей не менее 2,0 плавков.

Разработанный комплекс технологических приемов формирования по периодам продувки конвертерной ванны магнезиальных шлаков рекомендованного состава предусматривает присадку в начале плавки совместно с известью, ОКД и марганцевым агломератом высокомагнезиальных флюсов в количестве 70 – 80 % от их общего расхода на плавку. При этом на протяжении основного времени продувки обеспечивается формирование шлаков, стремящихся к насыщению оксидом магния (6 – 8 % MgO), и присадку в заключительный период продувки высокомагнезиальных флюсов в количестве 20 – 30 % от общего расхода материала с одновременным повышением положения фурмы над уровнем ванны до 3,0 – 3,5 м и последующим плавным переходом в рабочее положение по истечении 85 – 90 % общего количества кислорода на плавку [18]. Указанные мероприятия обеспечивают формирование высокомагнезиальных шлаков при значительном пере- насыщении оксида магния MgO (10 – 14 %) и основности в пределах 3,8 – 4,0.

Реализация в конвертерном цехе ОАО «ЕВРАЗ НТМК» разработанного комплекса технологических приемов обеспечила формирование в основное время продувки магнезиальных шлаков, обладающих низкой агрессивностью воздействия на футеровку конвертеров и сохраняющих высокие рафинирующие свойства. Химический состав металла и шлака опытных плавков в соответствии с разработанным режимом формирования шлака приведен в таблице.

Формируемые на протяжении основного (0 – 70 %) периода продувки магнезиальные шлаки находятся в относительно гомогенной области, стремящейся к насыщению оксидом MgO, обеспечивают достаточно высокую степень дефосфорации металла, превышающую 70 %. Смещение конечных магнезиальных шлаков в область значительного пере- насыщения оксида MgO при рассматриваемой температуре ванны не ухудшает степень дефосфорации металла, достигающую в среднем 78,4 %.

Соотношение скоростных возможностей рассматриваемых потоков фосфора в магнезиальном шлаке, формируемом в области, стремящейся к насыщению MgO и металлом, в 7,4 раза превышает единицу, что свидетельствует о лимитирующей роли внутридиффузионного фактора в процессе дефосфорации углеродистого полупродукта под магнезиальными шлаками [18]. Интенсификация массообменных процессов в условиях комбинированной продувки обеспечивает более высокие скорости окисления фосфора, что подтверждает лимитирующую роль внутридиффузионного звена.

Освоение разработанного комплекса технологических приемов [18] в совокупности с рядом технических решений (улучшение качества огнеупорных изделий, изменение схемы кладки и регламента эксплуатации футеровки) позволило достичь рекордной стойкости футеровки конвертеров, превышающей 7000 плавков, с сохранением высоких технологических и технико-экономических показателей процесса. Степень дефосфорации низкоуглеродистого металла под магнезиальными шлаками рационального состава достигла в среднем 79,3 % (против 70,5 % на плавках текущего производства). Отмечено сокращение расхода огнеупорного кирпича на футеровку конвертера на 0,07 кг/т стали, кирпича на «подварку» на 0,364 кг/т и ремонтной огнеупорной массы на 0,09 кг/т.

Химический состав металла и шлака опытных плавков в соответствии с разработанным режимом формирования шлака

Chemical composition of the metal and slag of experimental heats in accordance with the developed slag formation mode

Период продувки, %	MgO _ф , %	MgO _н , %	MgO _ф /MgO _н	B, ед.	t _{Me} , °C	Содержание, % (по массе)				
						[C]	[P] _ф	[P] _р	[P] _ф /[P] _н	ΔP, % отн.
0 – 30	8,3	8,0	1,03	2,0	1425	1,90	0,010	0,0021	4,8	68,7
31 – 70	7,0	7,3	0,96	2,9	1525	1,10	0,006	0,0025	2,4	81,3
71 – 100	14,5	7,9	1,83	3,9	1642	0,07	0,005	0,0035	1,4	84,4

П р и м е ч а н и е. MgO_ф – фактическая концентрация оксида магния в шлаке, %; MgO_н – концентрация насыщения оксида магния в шлаке, %; MgO_ф/MgO_н – степень насыщения шлака оксидом магния; B – основность, выраженная отношением CaO/SiO₂; t_{Me} – температура металла, °C; [C] – концентрация углерода в металле, %; [P] – фактическая концентрация фосфора в металле, %; [P]_р – равновесная концентрация фосфора в металле, %; [P]_ф/[P]_р – отношение фактической концентрации фосфора в металле [P]_ф к равновесному его содержанию [P]_р; ΔP – степень дефосфорации металла, %.

ПЕРЕДЕЛ НИЗКОМАРГАНЦОВИСТЫХ ЧУГУНОВ В 350-Т БОЛЬШЕГРУЗНЫХ КОНВЕРТЕРАХ ПОД МАГНЕЗИАЛЬНЫМИ ШЛАКАМИ

Стойкость футеровки большегрузных конвертеров АО «ЕВРАЗ объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК») при использовании флюса ожеженного магнезиально-известкового (ФОМИ) для выплавки стали и нанесения огнеупорного покрытия (гарнисажа) составляет в среднем 4500 – 5000 плавок при расходе конвертерных огнеупоров 3,5 – 4,0 кг/т стали. При этом формирование огнеупорного покрытия на футеровку путем раздува конечного магнезиального шлака азотом не всегда обеспечивает получение устойчивых результатов.

В текущем производстве достаточно часто приходится использовать специальные технологические приемы для формирования шлакового гарнисажа высокой стойкости [19]. С этой целью, используя результаты опытно-промышленных плавок с дополнительными повалками конвертера, был выполнен анализ влияния режимов продувки ванны конвертера на особенности формирования магнезиальных шлаков. На опытных плавках формирование шлака обеспечивали за счет присадки извести, содержащей не менее 88,5 % CaO, алюминиевой выбойки, содержащей 50 % C, 35 % CaF₂ и 12 % Al₂O₃, и высокомагнезиального флюса ФОМИ, содержащего не менее 66 % MgO. Присадку флюса в конвертер в количестве 15 – 18 кг/т стали выполняли совместно с известью в завалку на металлический лом до его предварительного нагрева, в том числе для ускорения процесса шлакообразования.

Выполненный теоретический анализ фазовых превращений в шлаке по ходу продувки конвертерной ванны на основе диаграммы четырехкомпонентной оксидной системы CaO'–MgO'–FeO'–SiO₂' показал, что оксидные системы, соответствующие шлакам начала продувки, содержат большое количество SiO₂, как правило, кристаллизуются с образованием различных силикатов, вюститита и незначительного количества периклаза. В оксидных системах, соответствующих шлакам середины продувки, возрастает содержание периклаза. В заключительный период продувки магнезиальные шлаки кристаллизуются с образованием двухкальциевого силиката – (2CaO·SiO₂), извести и твердого раствора магнезиовюститита [19]. Количество извести в шлаке связано с величиной основности (CaO/SiO₂), а количество магнезиовюститита – с величиной основности и содержанием MgO и FeO в шлаке. Состав силикатов зависит от соотношения между содержаниями CaO, MgO и FeO_x. При возрастании количества магнезии в шлаке увеличиваются содержания мервинита (3CaO·MgO·2SiO₂) и монтичеллита (CaO·MgO·SiO₂). При увеличении окисленности шлака возрастает содержание кирштайнита – CaO·FeO·SiO₂.

Присадка высокомагнезиального флюса при подготовке шлака к раздуву азотом сопровождается в соответствии с расчетным соотношением равновесных фаз увеличением содержания извести и магнезиовюститита при уменьшении содержания двухкальциевого силиката. При этом происходит изменение состава магнезиовюститита: увеличивается содержание тугоплавкой составляющей (периклаза) и уменьшается содержание легкоплавкой составляющей (вюститита).

Отмечено, что в начальный период продувки при низкой основности шлака содержание MgO не оказывает влияния на насыщение шлака оксидом магния. При повышенном содержании MgO отмечается уменьшение основности, в результате разница между фактическим содержанием магнезии и ее концентрацией насыщения не изменяется. В середине продувки концентрация оксида MgO в окисленном шлаковом расплаве определяет характер воздействия шлака на огнеупорную футеровку агрегата. При повышенном содержании оксида магния в расплаве шлак находится вблизи области насыщения магнезией, а при понижении содержания MgO шлак оказывает коррозионное воздействие на футеровку. В заключительном периоде продувки содержание магнезии определяет степень пересыщения шлака оксидом MgO.

Проведен анализ микроструктуры гарнисажного слоя: значительно больше крупных тугоплавких кристаллов двухкальциевого силиката и периклазидов, которые вместе с нерастворившимися зернами периклаза и извести образуют каркасную структуру и формируют гарнисаж за счет затвердевания шлакового расплава на поверхности футеровки вследствие кристаллизации при отводе тепла через нее.

Повышение износоустойчивости защитного покрытия безусловно требует увеличения в шлаке количества крупных кристаллов кальциооливина. Для раннего формирования кристаллов последнего необходимо обеспечить за счет технологических приемов ускоренное растворение извести в начальный период продувки конвертерной ванны. Только после ошлакования расплавом основного количества извести (не ранее 4 – 5 минуты продувки) рекомендуется присаживать магнезиальные материалы. При этом необходимо поддерживать повышенную окисленность шлака для ускорения процесса растворения флюса и недопущения перекристаллизации периклаза.

ПЕРЕДЕЛ ФОСФОРИСТЫХ ЧУГУНОВ В 300-Т КИСЛОРОДНЫХ КОНВЕРТЕРАХ ПОД МАГНЕЗИАЛЬНЫМИ ШЛАКАМИ

Конвертерный цех АО «АрселорМиттал Темиртау» перерабатывает фосфористые чугуны с широким диапазоном химического состава и температуры. В зависимости от содержания кремния, марганца и фосфора

в чугунах и требованиях, предъявляемых к качеству готового металла, в цехе используют четыре варианта технологии: одношлаковый процесс, процесс со скачиванием кислого шлака (20–30 % основного времени продувки), двухшлаковый процесс со скачиванием шлака по истечении 60–70 % времени продувки и трехшлаковый процесс со скачиванием кислого и промежуточного шлака [20].

Ранее используемый шлаковый режим конвертерной плавки независимо от варианта технологии обеспечивал в условиях фосфористого передела формирование конечных магнезиальных шлаков с достаточно высокими рафинирующими свойствами. Однако стойкость футеровки конвертеров не превышала 1700–1900 плавов.

Для условий передела фосфористых чугунов разработан рациональный по периодам продувки состав магнезиальных шлаков. В начале продувки в диапазоне температур 1350–1400 °С при основности шлака 1,5–2,0, содержащего примерно 20 % FeO, концентрацию MgO достаточно поддерживать на уровне 5,8–7,0 %; по истечении 60–70 % времени продувки при температуре 1500–1550 °С при основности шлака 2,0–2,5 и содержании FeO примерно 15 % – на уровне 6,3–7,7 %; на заключительном этапе продувки при температуре 1600–1650 °С, основности шлака 3,0–3,5 и содержании FeO примерно 30 % – на уровне 6,0–7,0 %.

Для формирования в основное время продувки магнезиальных шлаков указанного состава разработан дифференцированный режим присадки магнезиальных материалов, который включает оставление конечного высокомагнезиального шлака с присадкой в первой половине времени продувки извести и доломита. В дальнейшем после промежуточного скачивания шлака выполняется присадка высокомагнезиального флюса МГФ, содержащего 70–80 % MgO в заключительном периоде рафинирования при расходе 75–90 % от общего количества кислорода на плавку.

Результаты исследования фазового состава конечных магнезиальных шлаков, формируемых в процессе конвертирования фосфористых чугунов, показали, что магнезиальный шлак основностью 2,9–3,0 имеет ярко выраженную мелкокристаллическую структуру, представленную высокотемпературной фазой – силикофосфатом кальция в количестве 33–35 % в виде округлых, вытянутых частиц, окружающих высокотемпературную ферритную фазу ожелезненного периклаза, который представлен отдельными частицами округлой корродированной формы с наличием на периферии реакционной каемки магнезиовюстита и магнезиоферрита. Мелкие частицы твердых растворов магнезиовюстита и магнезиоферрита наблюдаются во всем объеме матрицы. Суммарное содержание фаз магнезиовюстита и магнезиоферрита и ожелезненного периклаза находится в пределах 27–29 %. Низкотемпературные ферритные фазы ферритов кальция и вюстита кальция

составляют 25–30 % и представлены в виде пленок, расположенных в высокотемпературной матрице. Формируемый на основе таких шлаков гарнисаж характеризуется повышенной износоустойчивостью в пределах не менее двух плавов.

Магнезиальные шлаки с повышенной до 3,5 основностью характеризуются значительно меньшим количеством высокотемпературных силикатных и ферритных фаз. Силикофосфат кальция в количестве 28–30 % представлен чередующимися, прерывистыми, округло-вытянутыми частицами. Все остальное пространство между частицами силикофосфата кальция заполнено серией твердых растворов феррита и вюстита кальция, концентрация которых достигает 38–41 %. Наличие высокой доли легкоплавких ферритных фаз, выполняющих роль цементирующей связки между высокотемпературными фазами, не обеспечивает высокой износоустойчивости формируемого гарнисажа, стойкость которого не превышает, как правило, одной плавки.

Внедрение разработанного комплекса технологических приемов формирования магнезиальных шлаков рекомендованного химического состава по периодам продувки фосфористых чугунов и износоустойчивостью гарнисажа на базе конечных магнезиальных шлаков умеренной основности обеспечило стойкость футеровки кислородных конвертеров более 5000 плавов с сохранением высоких технологических и технико-экономических показателей фосфористого передела.

ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПЛАВКИ СТАЛЬНОГО

ПОЛУПРОДУКТА В СОВРЕМЕННЫХ ДСП-135

ПОД МАГНЕЗИАЛЬНЫМИ ШЛАКАМИ

В настоящее время в структуре сталеплавильного производства прослеживается устойчивая тенденция увеличения доли выплавки стали в ДСП, которая достигает более 30 %. Одной из основных тенденций улучшения технологических и технико-экономических показателей в электросталеплавильном производстве является работа современных ДСП под магнезиальными шлаками [10–17]. К важнейшим свойствам шлака, которые влияют на его «вспениваемость», относят химический состав, основность, вязкость, поверхностное натяжение и наличие взвешенных твердых частиц, которые могут являться центрами зарождения газовых пузырей и стабилизировать пену. Для определения оптимального для вспенивания состава шлака рекомендуют [11, 13, 14, 21] использовать изотермические сечения фазовых диаграмм, анализ которых позволяет считать перспективным формирование магнезиальных шлаков с химическим составом, соответствующим области с магнезиальным вюститом и ларнитом. Такие шлаки будут устойчиво пениться при вдувании углеродсодержащих материалов, а также будут полностью совместимыми с магнезиальными огнеупорами.

В ЭСПЦ ПАО «Северский трубный завод» выполнен комплекс экспериментальных исследований по изучению влияния уровня вспенивания шлака в ДСП-135 на отдельные технико-экономические показатели процесса [21].

Высоту слоя вспененного шлака в ДСП-135 определяли по углу наклона печи и расстоянию между порогом и открытой заслонкой рабочего окна, которые обеспечивают максимальное удержание в печи формируемого объема вспененного шлака.

Оценка влияния высоты слоя вспенивания шлака на технико-экономические показатели процесса выплавки стального полупродукта показала тенденцию к сокращению расхода электроэнергии и времени работы печи под током с увеличением высоты этого слоя. При высоте слоя вспененного шлака 300 – 380 мм процесс выплавки полупродукта в ДСП характеризуется повышенными расходом электроэнергии и временем работы печи под током. Расход электроэнергии на 100 % плавов составляет более 54 МВт·ч, а длительность работы печи под током превышает 39 мин. При высоте шлаковой пены 390 – 510 мм расход электроэнергии изменяется от 49,5 до 54,5 МВт·ч и на 94 % плавов не превышает 54 МВт·ч. При этом на 83 % плавов длительность работы печи под током не превышает 39 мин. Однако при более высоком слое шлаковой пены (более 510 мм) наблюдается тенденция к увеличению расхода электроэнергии и времени работы печи под током. Это обусловлено, по-видимому, тем, что при избыточной толщине слоя шлака происходит перекрытие электродов, что и приводит к срабатыванию максимальной токовой защиты печного трансформатора из-за увеличения концентрации проводящих частиц в шлаке, притягиваемых из пограничного слоя.

Результаты исследования влияния химического состава шлаков на эффективность его вспенивания показывают, что формирование шлаков основностью более 1,9, содержащих 24 – 36 % FeO и не менее 7,2 % MgO, приближающихся к области насыщения MgO, обеспечивает высокую вероятность достижения рекомендованного уровня вспенивания шлака в пределах 390 – 510 мм и, как следствие, пониженный расход электроэнергии (не более 54 МВт·ч) и длительность работы печи под током не более 39 мин.

Исследования вещественного состава шлаков по периодам плавки в ДСП-135 показали, что шлаки умеренной основности с повышенным до 31 % содержанием FeO, формируемые в области насыщения MgO, обладают низкой вязкостью и высокими рафинирующими свойствами, обеспечивают в течение всего периода плавки в ДСП сохранение рекомендованного уровня шлаковой пены за счет присутствия в жидком шлаке большого количества высокотемпературных соединений ларнита, магнезиовюстита и магнезиоферрита, которые являются центрами зарождения пузырей CO

и способствуют вспениванию шлака и формированию устойчивой шлаковой пены [21].

Результаты теоретических и экспериментальных исследований были положены в основу разработки рационального состава магнезиальных шлаков по периодам плавки в ДСП, обеспечивающих формирование устойчивой шлаковой пены, сохранение высоких рафинирующих свойств, и обладающих низкой агрессивностью воздействия на футеровку печи. В качестве основных технологических приемов формирования таких шлаков было рекомендовано оставлять в печи высокомагнезиальные шлаки окислительного периода (технология работы печи на «болоте»), содержащих 7,5 – 8,5 % MgO, осуществлять в период плавления лома присадку в печь извести, содержащей не менее 92 % CaO, совместно с антрацитом, содержащим 92 – 94 % углерода и в окислительный период при расходе электроэнергии на уровне 75 – 88 % за плавку присадку в два приема высокомагнезиального флюса «Магма», содержащего 70 – 80 % MgO, в количестве 6,5 – 10,0 кг/т стали [21].

Внедрение разработанных технологических режимов формирования магнезиальных шлаков по периодам плавки обеспечило рекордную стойкость огнеупорной футеровки печи более 1900 плавов за кампанию и высокий уровень технологических и технико-экономических показателей процесса. Продолжительность работы печи под током сократилась в среднем на 1,5 мин, удельный расход электроэнергии уменьшился в среднем на 11 кВт·ч/т стали. Отмечено сокращение расхода извести в среднем на 6,7 кг/т стали, углеродсодержащих материалов для вспенивания шлака на 3,9 кг/т стали, расхода огнеупорных материалов на футеровку в среднем на 4,6 кг/т стали, торкрет-массы на ремонт шлакового пояса на 0,7 кг/т стали и заправочных материалов на восстановление откосов на 3,4 кг/т стали. При этом формируемые шлаки сохраняют высокие рафинирующие свойства.

Выводы

Результаты фундаментальных исследований физико-химических свойств основных магнезиальных шлаков были положены в основу разработки рационального их состава и технологических приемов формирования по периодам продувки конвертерной ванны и периодам плавки в ДСП.

Реализация в конвертерном цехе ОАО «ЕВРАЗ НТМК» разработанного комплекса технологических приемов формирования в основное время продувки магнезиальных шлаков, обладающих низкой агрессивностью воздействия на футеровку конвертеров с сохранением высоких рафинирующих свойств и износоустойчивого гарнисажа на базе магнезиальных конечных шлаков обеспечила рекордную стойкость футеровки конвертеров, превышающую 7000 плавов, с со-

хранением высоких технологических и технико-экономических показателей процесса.

В работе по переделу низкомарганцовистых чугунов в 350-т большегрузных конвертерах АО «ЕВРАЗ ЗСМК» под магнезиальными шлаками изучены особенности шлакообразования и изменения химического состава шлака по периодам конвертерной плавки.

При переделе фосфористых чугунов в 300-т кислородных конвертерах на АО «АрселорМиттал Темиртау» разработан комплекс технологических приемов формирования магнезиальных шлаков рекомендованного химического состава по периодам продувки фосфористых чугунов и износоустойчивостью гарнисажа на базе конечных магнезиальных шлаков умеренной основности, реализация которых обеспечила стойкость футеровки кислородных конвертеров более 5000 плавов с сохранением высоких технологических и технико-экономических показателей фосфористого передела.

В ЭСПЦ ПАО «Северский трубный завод» разработана технология формирования по периодам плавки ДСП-135 магнезиальных шлаков рационального состава, внедрение которой обеспечило рекордную стойкость огнеупорной футеровки печи более 1900 плавов за кампанию и высокий уровень технологических и технико-экономических показателей процесса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Конвертерное производство стали: состояние, доминирующие тенденции, прогнозы / Е.В. Протопопов, С.Н. Кузнецов, С.В. Фейлер и др. – В кн.: *Металлургия: технологии, инновации, качество. Труды XX Международной научно-практической конференции. В 2 ч. Ч. 2 / Под ред. Е.В. Протопопова.* – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2017. С. 4 – 9.
2. Калиш Д., Синельников В.О., Куглин К. Исследования физико-химических свойств шлака при его разбрызгивании на футеровку кислородного конвертера // *Новые огнеупоры.* 2017. № 3. С. 78 – 83.
3. Leonard R.J., Herron R.H. Dolomite additions required to saturate BOF slags with MgO // *Open Hearth Proceedings.* 1977. Vol. 60. P. 127 – 133.
4. Пантейков С.П. Анализ мирового развития и современное состояние технологий ошлакования футеровки кислородных конвертеров // *Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация».* 2013. № 6. С. 65 – 78.
5. Klages G., Schulz E. Entwicklung der konverter haltbarkeit in den Stalwerken der Thyssen Stahl AG nach Einfuehrung des TBM-Verfahrens // *Thyssen Tech. Ber.* 1984. Vol. 16. No. 2. P. 103 – 108.
6. Sian C., Wenyuan Y., Congjle Z. Slag splashing for bao steel's 300-metric ton BOF and crystallographic structure of its slag // *Iron and Steelmaker.* 2000. No. 7. P. 39 – 41.
7. Deo B., Halder J., Snoeijer B., Overbosch A., Boom R. Effect of MgO and Al₂O₃ variations in oxygen steelmaking (BOF) slag in slag morphology and phosphorus distribution // *Ironmaking and steelmaking.* 2005. Vol. 32. No. 1. P. 54 – 60.
8. Martino M., Fenu M., Anfosso A. Refractory lining for oxygen converters: recent experiences in this field. – In: *Proceedings of 5th European Steelmaking Conference, 26-28 June, 2006, Aachen, Germany.* – Dusseldorf: Steel Institute VDEh, 2006. P. 229 – 233.
9. Mills K.C., Su Y., Fox A.B., Li Z., Thackray R.P., Tsai H.T. A review of slag splashing // *ISIJ International.* 2005. Vol. 45. No. 5. P. 619 – 633.
10. Хорошавин Л.Б., Перепелицын В.А., Кононов В.А. Магнезиальные огнеупоры. Справ. изд. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 576 с.
11. Шалимов А.Г. Формирование вспененных шлаков в дуговой сталеплавильной печи // *Электротехнология.* 2013. № 9. С. 8 – 13.
12. Luz A.P., Avila T.A., Bonadia P., Pandolfelli V.C. Slag foaming: fundamentals, experimental evaluation and application in the steel-making industry // *Refractories Worldforum.* 2011. Vol. 3. No. 2. P. 91 – 98.
13. Кожухов А.А., Федина В.В., Меркер Э.Э. Исследование процесса вспенивания сталеплавильного шлака и его влияния на тепловую работу дуговой сталеплавильной печи // *Металлург.* 2012. № 3. С. 42 – 44.
14. Sanford D., Garside B., Schonewille C., Mill T. EAF refractory performance at pacific steel // *Iron and Steel Technology.* 2004. Vol. 1. No. 8. P. 48 – 55.
15. Обст К.Х., Штрадтман Ю., Редер М. Воздействие на растворение извести добавками природных и синтетических флюсов // *Черные металлы.* 1978. № 16. С. 834 – 841.
16. Ito K., Fruehan R.J. Study on the foaming of CaO-SiO₂-FeO slags: Part I. Foaming parameters and experimental results // *Metallurgical Transactions.* 1989. Vol. 20 B. No. 4. P. 509 – 514.
17. González O.J.P. et al. Effect of Arc Length on Fluid Flow and Mixing Phenomena in AC electric arc furnaces // *ISIJ International.* 2010. Vol. 50. No. 1. P. 1 – 8.
18. Бабенко А.А., Фомичев М.С., Кривых Л.Ю. и др. Выплавка стали в 160-т конвертерах из углеродистого полупродукта под магнезиальными шлаками // *Сталь.* 2010. № 8. С. 35 – 38.
19. Амелин А.В., Протопопов Е.В., Калиногорский А.Н., Фейлер С.В. Формирование гарнисажа магнезиальных шлаков на футеровке большегрузных конвертеров // *Сталь.* 2014. № 7. С. 22 – 25.
20. Бабенко А.А., Смирнов Л.А. Теория и технология передела фосфористых чугунов в кислородных конвертерах. – Новосибирск: Академиздат, 2018. – 243 с.
21. Ушаков М.В., Бабенко А.А., Мурзин А.В., Кузякин В.Г., Шартинов Р.Р. Теоретические и технологические особенности выплавки полупродукта в ДСП под магнезиальными шлаками. – В кн.: *Сборник трудов XV международного конгресса сталеплавильщиков и производителей металла.* – Москва-Тула: ООО «РПК ПринтАП», 2018. С. 142 – 148.

Поступила в редакцию 15 апреля 2020 г.

После доработки 16 июня 2020 г.

Принята к публикации 16 июня 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. NO. 7, PP. 491–498.

SMELTING OF STEEL SEMI-PRODUCT IN BOF AND EAF UNDER MAGNESIAN SLAGS

A.A. Babenko¹, L.A. Smirnov^{1,2}, E.V. Protopopov³,
L.Yu. Mikhailova¹

³Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo
Region – Kuzbass, Russia

¹Institute of Metallurgy, UB RAS, Ekaterinburg, Russia

²JSC “Ural Institute of Metals”, Ekaterinburg, Russia

Abstract. Basics for the development of a rational composition of the main magnesium slags and technological methods for their formation accord-

ing to the periods of BOF bath blowing and the periods of smelting in EAF are the results of fundamental studies of the slags physico-chemical properties. Implementation in the converter shop of OJSC “EVRAZ NTMK” of a developed set of technological methods of magnesian slags formation in the main period of blowing and a wear-resistant skull on the basis of magnesian final slags ensured record durability of converter linings. These slags have low aggressive effect on the lining of converters, while maintaining high refining properties. The durability of the converters’ lining exceeds 7000 heats, while maintaining high technological and technical-economic indicators of the process. During heats of low manganese cast irons in 350-metric ton heavy converters of JSC “EVRAZ ZSMK” under magnesian slags, the features of slag formation and changes in chemical composition of the slag were studied by the periods of the BOF bath blowing. During the process stage of phosphorous cast irons in 300-metric ton BOF at JSC “ArcelorMittal Temirtau”, a set of technological methods was developed for the formation of magnesian slags of the recommended chemical composition by the periods of phosphorous cast irons blowing and wear-resistant skulls based on final magnesian slags of moderate basicity. The implementation of the developed technological methods ensured the lining stability of BOF of more than 5 000 heats while maintaining high technological, technical and economic indicators of phosphorous process stage. In the EAF shop of PJSC “Seversky Pipe Plant” a technology for the formation of magnesian slags of rational composition was developed over the smelting periods in EAF-135. Introduction of the technology ensured the record resistance of the refractory lining of the furnace up to 1900 heats per campaign and high level of technological and technical-economic indicators of the process.

Keywords: BOF, EAF, lining resistance, magnesian slags, slag blowing, slag foaming, viscosity, chemical composition, phase composition.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-491-498

REFERENCES

1. Protopopov E.V., Kuznetsov S.N., Feiler S.V. etc. Production of converter steel: state, dominant trends, forecasts. In: *Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo. Trudy XX Mezhduнародnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. V 2. ch. Ch. 2 [Metallurgy: Technology, Innovations, Quality. Proceedings of the Int. Sci. – Pract. Conf. In 2 parts. Part 2]*. Protopopov E.V. ed. Novokuznetsk: SibGIU, 2017, pp. 4–9. (In Russ.).
2. Kalish D., Sinel'nikov V.O., Kuglin K. Investigations of the physico-chemical properties of slag sprayed onto BOF lining. *Novye ognepuory*. 2017, no. 3, pp. 78–83. (In Russ.).
3. Leonard R.J., Herron R.H. Dolomite additions required to saturate BOF slags with MgO. *Open Hearth Proceedings*. 1977, vol. 60, pp. 127–133.
4. Panteikov S.P. Analysis of world development and current state of the technology of slagging of BOF lining. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta “Chermetinformatsiya”*. 2013, no. 6, pp. 65–78. (In Russ.).
5. Klages G., Schulz E. Entwicklung der Konverter haltbarkeit in den Stalwerken der Thyssen Stahl AG nach Einfuehrung des TBM-Verfahrens. *Thyssen Tech. Ber.* 1984, vol. 16, no. 2, pp. 103–108. (In Germ.).
6. Sian C., Wenyuan Y., Congjie Z. Slag splashing for Baosteel’s 300-metric ton BOF and crystallographic structure of its slag. *Iron and Steelmaker*. 2000, no. 7, pp. 39–41.
7. Deo B., Halder J., Snoeijer B., Overbosch A., Boom R. Effect of MgO and Al₂O₃ variations in oxygen steelmaking (BOF) slag in slag morphology and phosphorus distribution. *Ironmaking and Steelmaking*. 2005, vol. 32, no. 1, pp. 54–60.
8. Martino M., Fenu M., Anfosso A. Refractory lining for oxygen converters: recent experiences in this field. In: *Proceedings of 5th European Steelmaking Conf., 26-28 June, 2006, Aachen, Germany*. Dusseldorf: Steel Institute VDEh, 2006, pp. 229–233.
9. Mills K.C., Su Y., Fox A.B., Li Z., Thackray R.P., Tsai H.T. A review of slag splashing. *ISIJ International*. 2005, vol. 45, no. 5, pp. 619–633.
10. Khoroshavin L.B., Perepelitsyn V.A., Kononov V.A. *Magnezial'nye ognepuory. Sprav. izd. [Magnesian refractories. Reference book]*. Moscow: Intermet Inzhiniring, 2001, 576 p. (In Russ.).
11. Shalimov A.G. Formation of foamed slag in EAF. *Elektrometallurgiya*. 2013, no. 9, pp. 8–13. (In Russ.).
12. Luz A.P., Avila T.A., Bonadia P., Pandolfelli V.C. Slag foaming: fundamentals, experimental evaluation and application in the steelmaking industry. *Refractories Worldforum*. 2011, vol. 3, no. 2, pp. 91–98.
13. Kozhukhov A.A., Fedina V.V., Merker E.E. Study of the foaming of steelmaking slag and its effect on the thermal performance of an electric-arc furnace. *Metallurgist*. 2012, vol. 56, no. 3-4, pp. 169–172.
14. Sanford D., Garside B., Schonewille C., Mill T. EAF refractory performance at pacific steel. *Iron and Steel Technology*. 2004, vol. 1, no. 8, pp. 48–55.
15. Obst K.Kh., Shtradtman Yu., Reder M. Effect of addition of natural and synthetic fluxes on lime dissolution. *Chernye metally*. 1978, no. 6, pp. 834–841. (In Russ.).
16. Ito K., Fruehan R.J. Study on the foaming of CaO-SiO₂-FeO slags: Part I. Foaming parameters and experimental results. *Metallurgical Transactions*. 1989, vol. 20 B, no. 4, pp. 509–514.
17. González O.J.P. etc. Effect of arc length on fluid flow and mixing phenomena in AC electric arc furnaces. *ISIJ International*. 2010, vol. 50, no. 1, pp. 1–8.
18. Babenko A.A., Fomichev M.S., Krivykh L.Yu. etc. Smelting steel from semiprocessed carbon hot metal under magnesia slag in 160-t converters Steel smelting from carbon semi-product in 160 t converters under magnesian slags. *Steel in Translation*. 2010, vol. 40, no. 8, pp. 733–736.
19. Amelin A.V., Protopopov E.V., Kalinogorskii A.N., Feiler S.V. Formation of magnesian slag skull on lining of heavy converters. *Stal’*. 2014, no. 7, pp. 22–25. (In Russ.).
20. Babenko A.A., Smirnov L.A. *Teoriya i tekhnologiya peredela fosforistykh chugunov v kislorodnykh konverterakh [Theory and technology of smelting phosphorous cast irons in BOF]*. Novosibirsk: Akademizdat, 2018, 243 p. (In Russ.).
21. Ushakov M.V., Babenko A.A., Murzin A.V., Kuzyakin V.G., Shartdinov R.R. Theoretical and technological features of smelting semi-product in EAF under magnesian slag. In: *Sbornik trudov XV mezhduнародnogo kongressa staleplavil'shchikov i proizvoditelei metalla [Proceedings of the 15th Int. Congress of Steelmakers and Metal Producers]*. Moscow – Tula: RPK PrintAP, 2018, pp. 142–148. (In Russ.).

Acknowledgements. The authors are grateful to S.A. Remigo, V.V. Levchuk, A.A. Dobromilov, H.S. Kutdusova, K.N. Demidov, T.V. Borisova, A.V. Murzin, M.V. Ushakov for the participation in the study.

Funding. The work was performed according to the State order to the Institute of Metallurgy of the Ural Branch of RAS.

Information about the authors:

Babenko A.A., Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Laboratory of Pyrometallurgy of Nonferrous Metals (babenko251@gmail.com)
L.A. Smirnov, Academician, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher (sekretar@uim-stavan.ru)
E.V. Protopopov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Ferrous Metallurgy (protopopov@sibsiu.ru)
L.Yu. Mikhailova, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate (ferrosta1@bk.ru)

Received April 15, 2020

Revised June 16, 2020

Accepted June 16, 2020