

Г.А. РУМЯНЦЕВА, канд. техн. наук,
Б.М. НЕМЕНЕНОК, д-р техн. наук,
В.Л. ТРИБУШЕВСКИЙ,
И.А. ГОРБЕЛЬ (БНТУ)

МАГНЕЗИАЛЬНЫЕ ФЛЮСЫ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИ ПЛАВКЕ СТАЛИ

Производительность плавильных агрегатов и себестоимость получаемой стали во многом зависит от стойкости огнеупорной футеровки, которая подвергается механическим и тепловым нагрузкам, а также агрессивному воздействию шлака. Считается, что основной причиной разрушения огнеупорной футеровки металлургических агрегатов является их химическое взаимодействие со шлаком [1].

Основным компонентом огнеупорных изделий в футеровке сталеплавильных агрегатов и сталеразливочных ковшей является периклаз (MgO), который входит в состав периклазовых, периклазоуглеродистых, шпинельнопериклазоуглеродистых, периклазошпинельноуглеродистых и алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров [2]. Процесс химического растворения периклазоуглеродистых огнеупоров в шлаковом расплаве зависит от температуры и химической природы шлака. Так, при прочих равных условиях, степень растворения огнеупора в шлаке тем меньше, чем больше концентрация MgO в нем приближена к равновесной. Корректировать состав шлака, приближая концентрацию оксида магния в нем к равновесной, можно путем использования магнийсодержащих материалов. Для этих целей используют флюсы ожелезненные магнезиальные ФОМ (ТТ200-282-2003) [3] и флюс обожженный магнезиально-известковый (ФОМИ) производства ОАО «Комбинат «Магнезит» (г. Сатка) [1, 4–6], высокомагнезиальный флюс «Флюмаг», поставляемый ОАО «Русское горно-химическое общество» [7], флюс марки «DALSLAG PL66» [4], доломитовый флюс ИМФ-30 [4], плавленный периклазовый порошок [4], ожелезненные доломитизированные флюсы типа ОДФ, ОДФ-К и др. Совершенно очевидно, что разные флюсы будут растворяться в шлаке с различной скоростью,

что скажется на интенсивности насыщения их оксидом магния и на растворении футеровки в шлаке в зависимости от типа плавильного агрегата и технологии плавки.

Решая проблему защиты футеровки сталеплавильного агрегата от взаимодействия ее со шлаками, следует также помнить о функциях, которые должны выполнять шлаки в определенные периоды плавки. В первую очередь это относится к удалению в шлак вредных примесей.

Основная цель применения магнезиальных флюсов при конвертерной плавке – повышение стойкости футеровки конвертеров в результате увеличения содержания MgO в шлаке. Увеличение MgO более 6 % обеспечивает снижение скорости износа футеровки конвертера при продувке кислородом плавки вследствие уменьшения разности концентраций MgO в периклазоуглеродистых огнеупорах и в шлаке, а также повышения термостойкости защитного шлакового гарнисажа в результате его насыщения тугоплавкими соединениями MgO·FeO и MgO·Fe₂O₃ с температурами плавления соответственно 1830 и 1730 °С [7, 8]. Для достижения высокой стойкости магнезиальной футеровки конвертера шлак в ходе всей плавки должен находиться в области насыщения MgO или приближаться к ней. Для обеспечения высокой стойкости защитного шлакового гарнисажа содержание MgO в шлаке должно быть на уровне 8–10 %, а по данным отдельных предприятий даже 10–12 % и более (LTD Steel Indiana Harbor, США; BAO Steel, Китай). Эта величина зависит от конкретных условий (состава, температуры жидкого чугуна, доли стального лома в шихте, стоимости шлакообразующих, себестоимости получаемой стали). Исследованиями авторов работы [7] установлено, что для условий кислородно-конвертерного цеха металлургического комбината «Азовсталь» оптимальная концентрация оксида магния в шлаке должна находиться на уровне 5–6 %. В этом случае MgO является разжижителем шлака; улучшаются процессы шлакообразования, дефосфорации металла в конвертере, а при увеличении концентрации MgO в шлаке более 8 % вязкость шлака существенно возрастает. Наиболее рационально присаживать флюсы, содержащие MgO, взамен части извести в самом начале продувки или до ее начала (в том числе для загущения шлака предыдущей плавки). В этом случае MgO способствует растворению CaO в шлаке, поскольку препятствует образованию двухкаль-

циевого силиката ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) вокруг частиц CaO , что особенно важно при холодных шихтовках плавов [7]. Кроме того, ранний ввод MgO необходим для насыщения первичного шлака магниезией, что важно для уменьшения износа футеровки. Более рационально присаживать магниезиальные материалы на лом: при вводе их на дно конвертера в условиях повышенной доли лома в шихте значительное количество чугуна может «намораживаться» на кусках лома в нижней части ванны и блокировать указанные материалы. В результате они начинают активно работать только спустя 5–8 мин после продувки кислородом и проплавления лома в нижней части конвертерной ванны, что снижает эффективность использования магниезиальных флюсов для защиты футеровки конвертера в начальный период плавки с наиболее агрессивным шлаком. Остальную массу магниезиальных флюсов целесообразно присаживать с известью порционно после устойчивого зажигания плавки и отдачи угля (до пятой минуты продувки) [7].

Для наведения шлакового гарнисажа на футеровке конвертера после окончания продувки расплава кислородом необходимо быстро повышать вязкость шлака, снижая его температуру, окисленность и вводя дополнительное количество MgO [9].

При получении после продувки чрезмерно жидких шлаков их загущают для получения после продувки азотом сплошного, равномерно распределенного по всей поверхности футеровки шлакового гарнисажа. Известно, что основные конечные шлаки, содержащие менее 8 % MgO , при введении доломита или извести для загущения шлака в процессе раздува азотом, не обеспечивают формирование износоустойчивого гарнисажа, поскольку они на 90 % находятся в области насыщения CaO и характеризуются высоким содержанием низкотемпературных фаз – ферритов кальция $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ и $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ с температурой плавления 1215 и 1440 °С соответственно. В результате формируемый гарнисажный слой обладает низкой эрозионной устойчивостью и практически не защищает футеровку [7].

Применение высокомагнезиального флюса «Флюмаг» позволяет сформировать стойкое гарнисажное покрытие на футеровке конвертера, состоящее из высокотемпературных фаз периклаза, магнизоферрита ($\text{MgO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) и магнизовюстита ($\text{MgO}\cdot\text{FeO}$), температура

плавления которых более 1750 °С с одновременным снижением легкоплавких ферритокальциевых фаз в конечном шлаке [7].

В работе [10] исследованы особенности формирования шлака при плавке низко- и среднеуглеродистых сталей с использованием ФОМИ в 350-тонных конвертерах. Химический анализ отобранных проб шлака показал, что при использовании флюса растворение извести протекает медленнее: содержание СаО в период продувки на 5–10 % ниже обычных значений, при этом наблюдается быстрое увеличение содержания MgO в шлаке при его повышенной окисленности. Температура плавления шлаков с использованием ФОМИ при изменении доли СаО от 23 до 38 % увеличивается с 1290 до 1440 °С, а на плавках без флюса содержание СаО в шлаке изменяется от 32 до 48 %, при этом температура плавления увеличивается с 1270 до 1400 °С. Применение высокомагнезиального флюса привело к снижению рафинирующей способности шлака [10]. Поэтому рекомендуется присаживать высокомагнезиальные флюсы только после ошлакования расплавом основного количества извести (не ранее 4–5 мин продувки). При этом целесообразно поддерживать повышенную окисленность шлака, чтобы ускорить процесс растворения флюса и не допустить перекристаллизации периклаза [10].

При использовании магнезиальных флюсов при плавке стали в крупнотоннажных электродуговых печах кроме защиты футеровки необходимо учитывать и их влияние на вспенивание шлака. В работе [5] приводится информация о методике определения оптимального для вспенивания состава шлака, исходя из диаграммы состояния системы $\text{FeO-MgO-SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$. Отмечается, что при определенном соотношении MgO и FeO в шлаке снижается износ футеровки, а вводимая добавка, содержащая оксид магния, ускоряет растворение извести и в целом формирование шлака. Для формирования магнезиальных шлаков в области насыщения оксидом магния при плавке в ДСП-135 был разработан двухстадийный режим присадки высокомагнезиального материала, содержащего около 80 % MgO. Реализация предложенного режима позволила сформировать устойчиво вспененный шлак, который наряду с экранированием дуг обеспечил снижение газонасыщенности металла в ДСП, снизил расход извести и электроэнергии, а также позволил улучшить другие показатели плавки [5].

Положительные результаты при использовании флюса ФОМИ при плавке в ДСП-100 отмечают и авторы работ [1, 4]. По отношению к обожженному доломиту, применяемому при корректировке MgO в шлаке, флюс ФОМИ имеет ряд преимуществ [1]:

- содержание MgO в исходном материале примерно в 2,4 раза выше;

- отсутствует пылевыведение в процессе подачи флюса в плавильный агрегат, поскольку в нем нет мелкой фракции;

- фазовый состав ФОМИ содержит 88–90 % периклаза; 3–6 % ферритов и 2–6 % силикатов, что обеспечивает высокую скорость растворения материала в шлаке.

При плавке в ДСП-100 в задачу окислительного периода входит удаление фосфора в шлак за счет наведения высокоосновных окислительных шлаков с повышенным содержанием FeO. Для снижения потерь оксида железа со шлаком в конце плавки необходимо проводить его раскисление коксом или антрацитом. Благодаря порционным присадкам антрацита непосредственно после отдачи флюса ФОМИ за 3–5 мин до выпуска удается снизить содержание оксида железа в шлаке в 1,4 раза, тем самым уменьшить его химическую агрессивность по отношению к футеровке. Повышение содержания оксида магния при одновременном снижении концентрации оксида железа в шлаке позволяет добиться увеличения вязкости шлака и, как следствие, образования защитного гарнисажа на футеровке стен выше шлакового пояса. Использование флюса ФОМИ с раскислением шлака в печи антрацитом обеспечило увеличение ресурса футеровки с 387 плавов до 500 [1].

Авторы работ [4, 11] отмечают положительное влияние на стойкость огнеупорных изделий сталеразливочного ковша повышенного содержания в шлаке оксидов магния и кальция. При этом следует учитывать увеличение вязкости шлака, что нежелательно при удалении серы из расплава стали. Кроме того, повышенное содержание MgO в шлаке приводит к трансформации неметаллических включений и образованию в расплаве шпинелей $MgO \cdot Al_2O_3$ и $CaO \cdot MgO \cdot Al_2O_3$. Поэтому на установке «печь-ковш» магниезиальные флюсы следует добавлять в конце операции по удалению в шлак серы. В этом случае успешно будут решаться задачи по десульфурации стали и защите футеровки сталеразливочных ковшей. Использование магниезиальных флюсов в 130-т сталеразливочных

ковшах на ОАО НКМЗ позволило увеличить стойкость ковшей на 11,4 % (с 77,2 плавков до 86), сократить объем ремонтного комплекта шлакового пояса на 22 % (с 4,5 до 3,5 т) [4]. На XI Международной конференции огнеупорщиков и металлургов в Москве [12] отмечалось, что использование шлаковой смеси с повышенным содержанием MgO в промежуточном ковше замедляет процесс износа периклазовой торкрет-массы в рабочем слое футеровки.

Таким образом, магнезиальные флюсы в зависимости от времени и способа их ввода в плавильный агрегат или сталеразливочный ковш позволяют защищать футеровку от разрушения в районе шлакового пояса и успешно решать задачи по удалению фосфора и серы из расплава стали.

Литература

1. Повышение стойкости футеровки тепловых агрегатов при использовании обожженного магнезиально-известкового флюса в условиях ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» / И.А. Бондаренко [и др.] // Литье и металлургия. – 2013. – № 2. – С. 78–81.

2. Турунов, Д.Н. Повышение эффективности применения огнеупоров в футеровке У КП / Д.Н. Турунов, Е.Н. Демченко, А.Г. Коваленко // Сталь. – 2007. – № 11. – С. 38–40.

3. Левада, А.Г. Опыт службы огнеупоров в ОАО ЧМК / А.Г. Левада, Д.Н. Макаров, В. И. Антонов // Сталь. – 2007. – № 9. – С. 37–40.

4. Устинов, В.А. Модель оценки эффективности использования высокомагнезиальных флюсов на примере корректировки состава шлака в сталеразливочном ковше / В.А. Устинов, Л.М. Аксельрод, М.И. Оржех // Сталь. – 2011. – № 7. – С. 30–36.

5. Двенадцатый конгресс сталеплавильщиков России // Сталь. – 2013. – № 1. – С. 18–29.

6. Семин, А.Е. Секция «Металлургия стали» XIII Международного конгресса сталеплавильщиков / А.Е. Семин // Сталь. – 2015. – № 1. – С. 13–15.

7. Применение высокомагнезиальных флюсов в конвертерном цехе ПАО «МК «Азовсталь» / Е.С. Попов [и др.] // Сталь. – 2015. – № 4. – С. 16–20.

8. Высокомагнезиальные флюсы для сталеплавильного производства / К.Н. Демидов [и др.]. – Екатеринбург: Уральский рабочий, 2013. – 280 с.

9. Дидковский, В.К. Использование магнезиальных шлакообразующих материалов для повышения стойкости футеровки кислородных конвертеров / В.К. Дидковский, Е.В. Третьяков. – М.: Черметинформация, 1985. – 23 с.

10. Формирование гарнисажа магнезиальных шлаков на футеровке большегрузных конвертеров / А.В. Амелин [и др.] // Сталь. – 2014. – № 7. – С. 22–25.

11. Оценка влияния агрессивности технологических факторов на износ алюмопериклазоуглеродистых изделий, применяемых в футеровке сталеразливочного ковша / А.А. Метелкин [и др.] // Сталь. – 2013. – № 5. – С. 29–31.

12. XI Международная конференция огнеупорщиков и металлургов в Москве // Сталь. – 2013. – № 7. – С. 29–32.

УДК 621.78.012.5

**П.Ю. ЦЫКУНОВ,
И.А. ТРУСОВА, д-р техн. наук,
И.В. РАФАЛЬСКИЙ, канд. техн. наук (БНТУ)**

ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ ЗАГОТОВОК РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

Математическое моделирование процессов индукционного нагрева металлических заготовок является важнейшим этапом проектирования индукционных нагревателей, а также плавильных печей. На этапе моделирования, как правило, рассматривают различные комбинации входных параметров индукционного нагрева (полезная мощность, частота тока и др.), оценивают распределение температуры на различных этапах нагрева и возникающие температурные напряжения в заготовках и изделиях. Конечным этапом моделирования может быть определение времени нагрева при заданных теплофизических свойствах нагреваемых заготовок и их геометрической формы, или же решение обратной задачи – подбор