А. А. **Коростелёв**[1,2] (✉), к. т. н. **Н. С. Съёмщиков**[1], д. т. н. **А. Е. Сёмин**[2], к. т. н. **Г. И. Котельников**[2], **И. С. Мурзин**[3], **В. В. Емельянов**[3], **Е. А. Колоколов**[3], **С. С. Белоножко**[3]

[1] *ООО «ВПО Сталь», г. Одинцово Московской обл., Россия*
[2] *ФГАОУ ВО «НИТУ «МИСиС», Москва, Россия*
[3] *ПАО «Таганрогский металлургический завод», г. Таганрог, Россия*

УДК 669.187.2:621.365.2.036.538

ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ ФУТЕРОВКИ ДСП ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГБЖ В ЗАВАЛКЕ

В настоящей статье приведен анализ влияния добавки горячебрикетированного железа (ГБЖ) на изменение основных технологических показателей плавки, стойкость рабочего слоя футеровки ДСП-150, расходы огнеупорных материалов для ее обслуживания в условиях ЭСПЦ ПАО «ТАГМЕТ». Рассмотрены разные схемы порционной загрузки ГБЖ в печь и определен оптимальный вариант. Приведен анализ изменения состава шлака при использовании ГБЖ. Предложены рекомендации по обслуживанию футеровки печи в условиях использования добавки ГБЖ на примере ДСП-150, работающей на твердой завалке, для повышения ее стойкости. Показан экономический эффект от внедрения предложенных рекомендаций.

Ключевые слова: *горячебрикетированное железо (ГБЖ), дуговая сталеплавильная печь (ДСП), стойкость футеровки, шлаковый режим, технологические показатели плавки, вспенивание шлака, периклазоуглеродистые (ПУ) изделия, магнезиальные массы.*

ВВЕДЕНИЕ

Стойкость футеровки дуговой сталеплавильной печи (ДСП) зависит от ряда факторов: энерготехнологического режима плавки, химического состава шлака и его температуры, качества обслуживания футеровки печи, применяемых материалов и пр. В настоящее время на металлургических предприятиях России активно применяется порционная добавка горячебрикетированного железа (ГБЖ) в металлошихту при выплавке стали в ДСП, работающей на твердой завалке, что отражается на стойкости футеровки. Отмечено снижение стойкости периклазоуглеродистой (ПУ) футеровки печи на 30–70 % (при увеличении доли ГБЖ в шихте до 35 %) относительно стойкости футеровки печи при работе на 100 %-ном ломе.

ГБЖ относится к одному из видов металлизованного сырья и является перспективным материалом для получения электростали с высокой степенью чистоты. Учитывая растущий недостаток качественного лома, использование такого сырья в металлошихте позволяет регулировать уровень остаточных примесей в получаемом полупродукте. Следует отметить, что экономически привлекательно использование этого сырья при замене им дорогостоящего вида лома в металлошихте. Известный однородный химический состав ГБЖ со стабильными свойствами позволяет снизить вероятность непопадания в заданный химический состав полупродукта при его производстве. Особенности использования металлизованного сырья в металлошихте и его влияние на показатели электроплавки описаны в публикациях [1–7].

Преимущества использования ГБЖ хорошо известны, но недостаточно освещаются в литературе отрицательные моменты его влияния на стойкость футеровки; отсутствуют стандартные приемы работы с таким сырьем. Отмечены противоречивые мнения о влиянии ГБЖ на технологические показатели электроплавки — расход энергоносителей, шлакообразующих добавок, стойкость футеровки и другие показатели. Все это зависит от ряда факторов: конструкции ДСП, энерготехнологических режимов, характеристик ГБЖ, способа загрузки ГБЖ в печь и пр. Это требует более подробного изучения особенностей применения перспективного материала — ГБЖ в металлошихте дуговых электропечей, работающих на твердой завалке. Из-за присутствия оксидов железа и пустой породы, содержащихся в ГБЖ, необходимо учитывать его влияние на технологические показатели плавки и стойкость футеровки ДСП.

При выплавке стали в ДСП важно учитывать текущее состояние рабочего слоя футеровки и

✉
А. А. Коростелёв
E-mail: koral-00@mail.ru

поддерживать его в надлежащем виде в течение всей кампании печи. Одними из основных мероприятий по уходу за футеровкой печи являются торкретирование, заправка подины и откосов, поддержание характеристик шлака на требуемом уровне. Неудовлетворительное состояние футеровки может привести к снижению срока ее службы или аварийному проникновению металла через металлический кожух, что в конечном итоге приведет к увеличению простоя печи, трудовым затратам при замене футеровки и снизит общую производительность ДСП. Для поддержания высокой стойкости футеровки осуществляют различные мероприятия:

– применение технологии насыщения шлака оксидом магния, поддержание высокой основности шлака и его вспенивание [8–10]. Вспененный шлак экранирует излучение электрической дуги и не только способствует более полному усвоению электрической энергии металлом, но и предохраняет футеровку печи [11–13];

– усиление футеровки в локальных зонах кладки, подверженных наибольшему износу (зоны электродов, газокислородных фурм), при использовании более качественного огнеупора либо увеличении его толщины;

– своевременное проведение горячего ремонта магнезиальной футеровки с использованием высококачественных заправочных материалов, торкрет-масс и профессионального оборудования, применяя квалифицированный комплексный подход [14, 15].

За последнее время при активном использовании ГБЖ в ДСП отмечено снижение стойкости ПУ-футеровки печи на 30–70 % (при доле ГБЖ в шихте до 35 %) относительно стойкости футеровки печи при работе на 100 %-ном ломе.

Цель настоящей работы — исследование влияния добавки ГБЖ в металлошихту на технологические показатели плавки, расход огнеупорных материалов и стойкость футеровки ДСП, работающей на твердой завалке, и разработка рекомендаций по повышению стойкости футеровки ДСП-150 в условиях ПАО «ТАГМЕТ» (ТАГМЕТ).

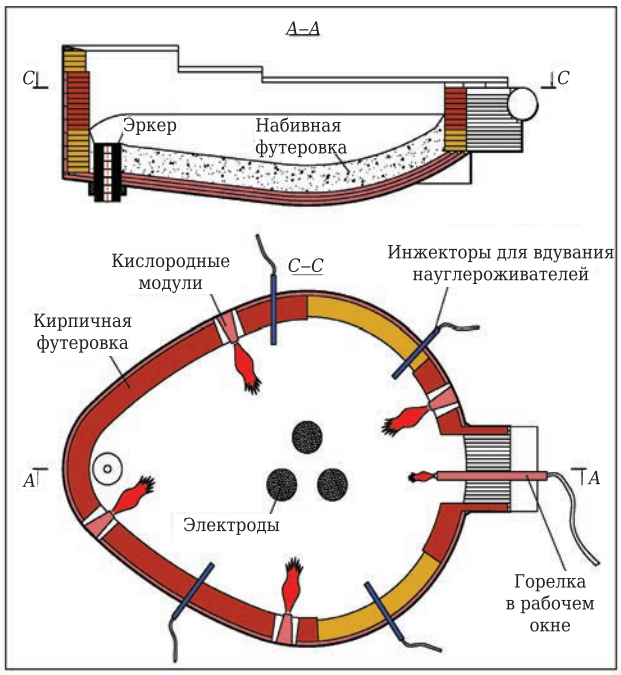

Рис. 1. Схема ДСП-150 ТАГМЕТ

ОПИСАНИЕ ДСП И ПРИМЕНЯЕМОГО СЫРЬЯ

Электропечь имеет следующие характеристики: мощность трансформатора 110 МВ·А, номинальная масса выпуска плавки 135 т («болото» ~ 15 т), длительность пребывания металла под током 49 мин. Печь оборудована пятью газокислородными модулями, четырьмя инжекторами для вдувания науглероживателя, тремя инжекторами для дожигания СО в рабочем пространстве печи. В печи производят следующие марки стали: средне- и низкоуглеродистые, низколегированные, среднелегированные, стали повышенной обрабатываемости. Схема ДСП-150 ТАГМЕТ показана на рис. 1.

Кожух печи с внутренней стороны обкладывают двумя слоями футеровки — арматурным и рабочим. Рабочий слой футеровки выполнен ПУ-огнеупором компании CORWINTEC толщиной 400–450 мм. В зонах повышенного износа используют ПУ-огнеупор, изготовленный из сырья повышенного качества и имеющий увеличенную толщину. Для создания ванны печи используют магнезиальную набивную массу. Футеровка печи показана на рис. 2. Рекомендованные характеристики полупродукта на выпуске из ДСП: температура металла 1640–1660 °С, содержание углерода в стали 0,07–0,10 %, содержание кислорода 500–700 ppm; содержание фосфора в полу-

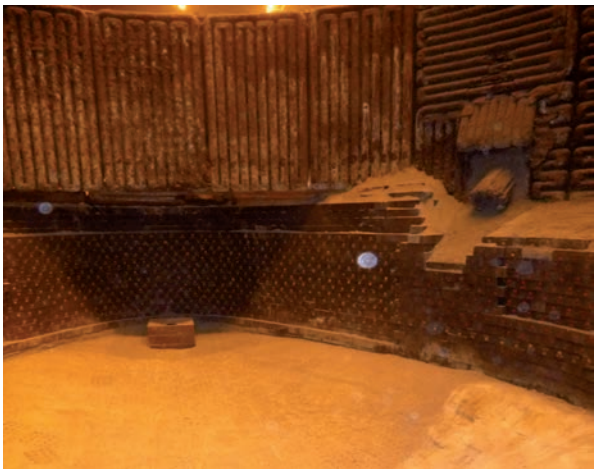

Рис. 2. Футеровка ДСП-150 после монтажа рабочего слоя стен (вид изнутри) и установки водоохлаждаемых панелей

продукте обеспечивают технологическим процессом на уровне 0,005–0,008 %.

ГБЖ представляет собой брикеты, полученные методом прямого восстановления из предварительно окомкованной железной руды, а затем спрессованные под давлением. Размеры брикета 110×50×30 мм, плотность 5 г/см^3. Содержание металлического железа в ГБЖ составляет 84,5 %, железа общего 90,6 %, углерода 1,04 %, SiO_2 4,3 %. ГБЖ загружали при помощи коробов в первую завалочную бадью послойно совместно с ломом. Общее количество металлошихты в завалке (первая бадья) около 90 т. Максимальное количество ГБЖ на плавку 51 т (36 % всей металлошихты). Общую долю ГБЖ на плавку определяли в зависимости от требуемого содержания меди в полупродукте.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГБЖ НА ПОКАЗАТЕЛИ ПЛАВКИ

При анализе плавок с использованием ГБЖ, произведенных в 2015 г. в ЭСПЦ ТАГМЕТ, было отмечено повышение основных удельных технологических показателей. Для проведения сравнительного анализа использовали два отчетных периода:

– 360 плавок из металлошихты, состоящей из 100 % металлического лома, при выплавке стали в 2014 г.;

– 345 плавок в феврале 2015 г. Из них 165 плавок с использованием ГБЖ и 180 плавок с использованием 100 % лома.

За период работы с использованием ГБЖ в металлошихте отмечены значительное снижение стойкости ПУ-футеровки печи и увеличение расхода огнеупорных материалов на обслуживание футеровки. Из табл. 1 видно, что с добавкой ГБЖ в металлошихту стойкость рабочего слоя футеровки ДСП снижается на 50,2 %, а удельный расход огнеупорных материалов повышается на 16–30 %. На повышенный износ рабочего слоя футеровки печи влияет состав шлака, основность которого снижается при увеличении доли ГБЖ в шихте. Это обусловлено присутствием значительного количества SiO_2 (4,3 %), входящего в состав ГБЖ. Необходимость повышения основности шлака влечет за собой увеличение расхода извести и MgO-содержащего флюса, что и отмечено при анализе данных плавок.

На повышенный износ футеровки при использовании ГБЖ влияет также повышенная тепловая нагрузка, обусловленная увеличением удельного расхода основных энергоресурсов: электроэнергии (на 20,2 %), кислорода (на 2,5 %), углеродсодержащего материала (на 39 %) и антрацита (на 10,4 %). Это связано с присутствием в ГБЖ оксидов железа (~7,5 %), а также пустой породы, которые повышают расход энергоносителей, так как на восстановление железа из оксида требуются дополнительные энергозатраты, а также повышаются тепловые и химические нагрузки на футеровку. На рис. 3 показана стойкость ПУ-футеровки ДСП на разных кампаниях в 2014–2015 гг. при выплавке стали с использованием 100 % лома и ГБЖ в завалке.

После проведения анализа влияния добавки ГБЖ на стойкость ПУ-футеровки была предложена схема оценки ее гарантированной стойкости (табл. 2) в зависимости от доли ГБЖ в завалке,

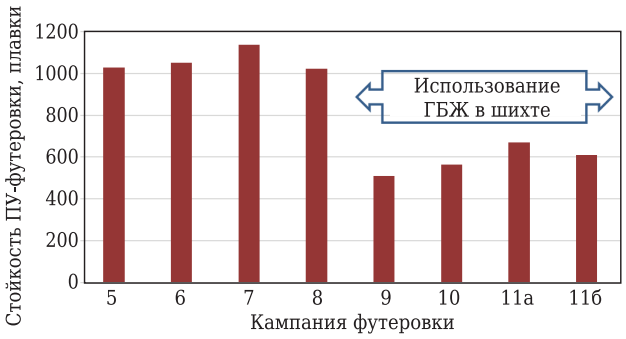

Рис. 3. Стойкость ПУ-футеровки печи при использовании разного сырья

Таблица 1. **Изменение средних удельных технологических показателей электроплавки при использовании ГБЖ в шихте**

Показатель	Работа ДСП на 100 % ломе	Работа ДСП с добавкой ГБЖ	Отклонение, %
Анализируемый период	2014 г.	Февраль 2015 г.	–
Количество плавок за анализируемый период	360	345 (из них с ГБЖ 165 плавок)	–
Среднее количество ГБЖ в завалке, %	0	11,2 (макс. за плавку 36 %, или 51 т)	–
Стойкость ПУ-футеровки ДСП (кампания футеровки, попавшая в анализируемый период), плавки	1021 (кампания № 8)	508 (кампания № 9)	–50,2
Расход подварочной (заправочной) массы, кг/т	1,44	1,68	16,7
Расход торкрет-массы, кг/т	1,0	1,3	30,0
Расход MgO-содержащего флюса, кг/т	6,5	9,1	40,0
Общий расход извести, кг/т	56,0	75,5	34,8
Расход электроэнергии, кВт·ч/т	425,5	511,5	20,2
Расход кислорода, м^3/т	39,9	40,9	2,5
Расход углеродсодержащего материала, кг/т	7,7	10,7	39,0
Расход антрацита, кг/т	11,5	12,7	10,4

Таблица 2. **Гарантированная стойкость ПУ-футеровки ДСП в зависимости от доли ГБЖ в шихте и других параметров**

Стойкость футеровки стен, плавки	Количество ГБЖ в завалке	Основность шлака	Расход			
			извести, кг/плавку	MgO-содержащего флюса, кг/плавку	торкрет-массы, кг/т стали	подварочной массы, кг/т стали
> 1500 > 1000 > 500	Не допускается < 20 т 20 т < ГБЖ < 45 т (< 40 % плавок), ГБЖ < 20 т (остальное)	> 2,2 > 2,1 > 1,95	> 6500 > 6500 > 7000	> 1000 (до рекомендуемого состава шлака)	> 1,18 > 1,18 > 2,45	> 1,33 > 1,33 > 1,65

основности шлака и расхода шлакообразующих и огнеупорных материалов для обслуживания футеровки.

АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ШЛАКА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В ШИХТЕ ГБЖ

Взаимодействие шлаков с огнеупорами определяется химическим составом шлаков, их строением, вязкостью, температурой и поверхностным натяжением. Химическую природу шлаков характеризует их основность (CaO/SiO_2). При CaO/SiO_2 < 2,5 агрессивность шлака повышенная [16], что отражается на стойкости футеровки. Для повышения срока службы огнеупора в него добавляют графит (до 15 %), который обладает низкой смачиваемостью шлаком и препятствует проникновению жидкой шлаковой фазы в огнеупор [17–19]. Смачивание огнеупора определяется в основном химическим составом шлаков и огнеупоров, а также температурой шлака.

Важно отметить роль такого технологического решения, как использование пенистых шлаков при выплавке стали. Формирование вспененного шлака в процессе выплавки стали в ДСП путем совместной продувки ванны кислородом и порошкообразным углеродом является одним из эффективных способов нагрева жидкого металла в печи. Наряду с основной функцией — удаления вредных примесей из расплавленного металла — вспененный шлак экранирует излучение электрической дуги и не только способствует более полному усвоению электрической энергии металлом, но и предохраняет футеровку печи.

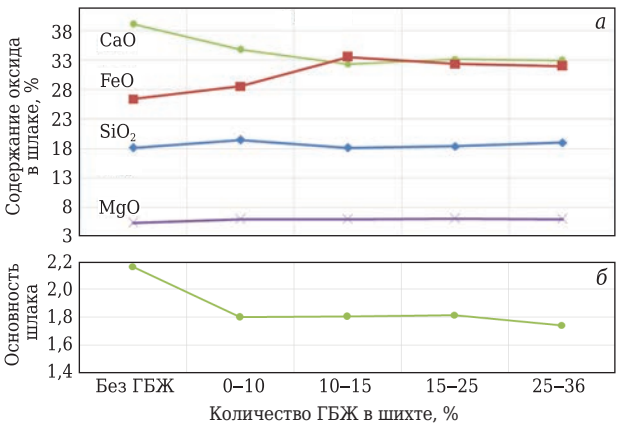

Рис. 4. Содержание оксида в шлаке (*а*) и его основность (*б*) при использовании разного количества ГБЖ в завалке (анализ по 107 плавкам)

Чтобы шлак хорошо пенился и обладал низким агрессивным воздействием на футеровку ДСП, он должен иметь определенные физико-химические характеристики. По данным [10, 13, 15], рекомендуемое оптимальное содержание MgO в печном шлаке должно составлять 8–12 %, основность шлака должна находиться на уровне 2–3 в зависимости от периода плавки и температуры расплава. Поэтому целесообразно провести анализ изменения состава шлака при повышении содержания добавки ГБЖ в ДСП. Для этого произвольно был отобран массив из 107 плавок с использованием разного количества добавки ГБЖ. Плавки были сгруппированы по интервалам с разным содержанием ГБЖ в шихте. Усредненные данные по химическому составу шлака и его основность в зависимости от доли ГБЖ в шихте показаны на рис. 4. Видно, что характеристики анализируемых печных шлаков при использовании ГБЖ отличаются от рекомендуемых выше, что отрицательно воздействует на футеровку ДСП и требует корректировки шлакового режима и расхода материалов на обслуживание печи. При добавке ГБЖ в металлошихту (> 10 %) увеличивается содержание FeO в шлаке от 26 до 33 %. Наблюдается снижение основности шлака при добавке ГБЖ от 2,2 до 1,8. Пониженная основность и повышенная окисленность шлака негативно влияют на ПУ-футеровку печи. В период использования ГБЖ при визуальном осмотре футеровки печи во время эксплуатации отмечено ее неудовлетворительное состояние (оголение кирпичной кладки стен), вызванное воздействием шлака.

ВЫПЛАВКА СТАЛИ В ДСП С ПОВЫШЕННОЙ ДОЛЕЙ ГБЖ В ШИХТЕ (> 20 %)

Максимальное количество отдаваемого ГБЖ в завалку за анализируемый период составило 51 т, или 36 % от массы металлошихты. В процессе выплавки полупродукта в ДСП-150 при повышении доли ГБЖ в завалке (> 25 %) были зафиксированы следующие проблемы.

1. Загрузка металлического лома в нижнюю часть ванны ДСП и ГБЖ в верхнюю часть (рис.

5, *а*). При таком способе загрузки металлошихты над поверхностью зеркала металла формируются крупные кластеры, состоящие из спекшегося ГБЖ, которые привариваются к футеровке стен и водоохлаждаемым панелям печи, образуя на них крупные настыли. После выпуска плавки из печи такие настыли под воздействием собственного веса могут обрушиться в ванну печи, увлекая за собой и разрушая кирпичную кладку стен, что может привести к аварийной ситуации.

2. Загрузка ГБЖ в нижнюю часть ванны ДСП и металлического лома в верхнюю (рис. 5, *б*). При таком способе загрузки на подине печи образуются наросты, состоящие из спекшегося ГБЖ. От плавки к плавке зарастание подины печи увеличивается, что уменьшает объем жидкой ванны. Длительность плавки не позволяет расплавить сформировавшиеся наросты, образование которых вызвано содержанием оксидов железа в ГБЖ.

3. Загрузка ГБЖ и металлического лома послойно. Учитывая возникающие проблемы при загрузке металлошихты в ДСП по первому и второму вариантам, оптимальным способом загрузки оказался вариант послойной отдачи сырья (рис. 5, *в*). ГБЖ загружали в первую завалочную бадью послойно совместно с ломом согласно следующей схеме: лом категории 15А, 16А (стружка) 10–15 т; ГБЖ 20 т; лом категории 3АН, 3АЭ 10–20 т; ГБЖ 15–20 т; лом категории 3АН, 3АЭ 10–20 т; ГБЖ 0–10 т; лом категории 3АН, 3АЭ 0–10 т. Такой способ загрузки позволяет снизить количество формирующихся тугоплавких кластеров, состоящих из ГБЖ.

Тем не менее даже при таком способе загрузки шихты при доле ГБЖ более 20 % возможно образование крупных настылей на стенах печи, преимущественно состоящих из ГБЖ (рис. 6). Образовавшиеся настыли прочно привариваются к водоохлаждаемым панелям печи выше уровня шлакового пояса, что обусловлено разницей температур между ними. Отсутствие достаточного количества тепла в локальных зонах ДСП не позволяет расплавить настыли. Даже увеличение длительности плавки не обеспечивает расплавления образовавшихся настылей и способствует повышенному износу ПУ-огнеупоров в шлаковом поясе. С другой стороны, открывается возможность использования ГБЖ в качестве материала, который образует защитный гарнисаж на рабочем слое футеровки и снижает его износ.

Рис. 6. Состояние футеровки ДСП после окончания кампании (661 плавка)

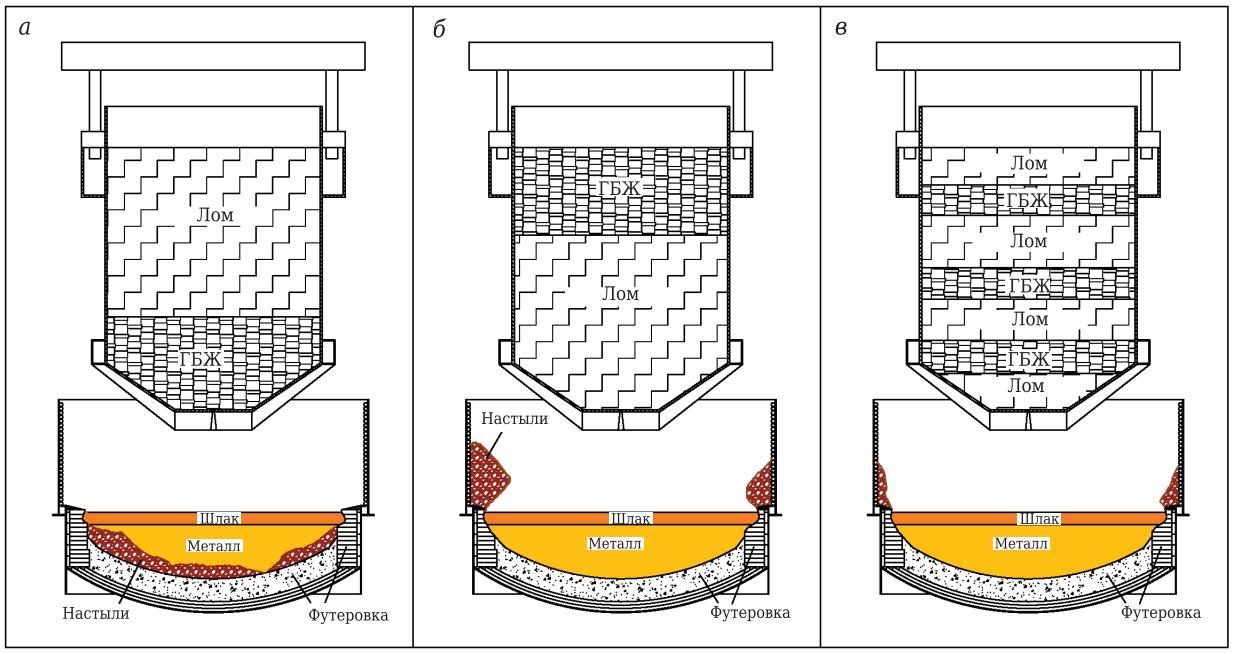

Рис. 5. Способы загрузки ГБЖ и металлического лома в ДСП-150

На рис. 7 показано состояние футеровки печи после кампании 610 плавок. Видно, что на ПУ-футеровке стен печи присутствует значительный слой гарнисажа, который может служить защитным слоем. Образовавшийся гарнисажный слой состоит из шлака и нерасплавившихся компонентов шихты, преимущественно из ГБЖ.

Рис. 7. Состояние футеровки ДСП после окончания кампании (610 плавок)

РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ СТОЙКОСТИ ФУТЕРОВКИ ДСП-150 ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГБЖ В ЗАВАЛКЕ В УСЛОВИЯХ ЭСПЦ ТАГМЕТ

Учитывая химический состав ГБЖ, а также возникающие проблемы, связанные с его использованием, были разработаны рекомендации по обслуживанию футеровки ДСП-150 для поддержания ее стойкости более 1000 плавок.

1. ***Загрузка ГБЖ в печь***. Учитывая присутствие в ГБЖ оксидов железа, для расплавления такого сырья требуется больше энергетических затрат по сравнению с расплавлением чистого скрапа. На стенах печи возможны образования больших настылей, состоящих из шихты, содержащей ГБЖ, что связано с отсутствием в этой зоне достаточного количества тепла для их расплавления. Причинами этого могут быть загрузка в печь повышенного количества ГБЖ и образование тугоплавких кластеров, которые привариваются к стенам печи. В то же время в горячих зонах печи (зоны электродов, зоны кислородной фурмы) можно наблюдать повышенный износ футеровки в шлаковом поясе.

В связи с этим целесообразно рассмотреть возможность распределения металлошихты в завалочной бадье таким образом, чтобы завалка более энергоемкой шихты (ГБЖ) осуществлялась в наиболее горячие зоны ДСП с образованием слоя гарнисажа в зонах повышенного износа футеровки. Рекомендуется рассмотреть возможность непрерывной подачи ГБЖ в печь, которая позволит улучшить энерготехнологические показатели плавки и обеспечить стабильное поддержание пенистого шлака. В текущих условиях оптимальным вариантом является послойный способ загрузки разнородной шихты в ДСП-150.

Не рекомендуется отдача металлошихты с долей ГБЖ в завалке 20–25 %.

2. ***Отдача извести***. С одной стороны, чистота ГБЖ по содержанию серы и фосфора по сравнению с ломом позволяет вести процесс дефосфорации в печи без повышения расхода извести, с другой — присутствие SiO_2 в ГБЖ снижает основность шлака, что отрицательно влияет на износ рабочего слоя футеровки. Поэтому рекомендуется поддерживать основность шлака в печи в среднем на уровне не менее 2,0. В связи с этим расчет расхода извести на 1 т производимой стали в зависимости от количества добавки ГБЖ в шихту рекомендуется производить по формуле, которая складывается из удельного расхода извести при работе на ломе и на ГБЖ:

$$Q_{изв} = A \cdot (1 - X/100) + 2 \cdot y/100/0{,}9 \cdot 1000 \cdot X/100 = (2 \cdot y/9 - A/100) \cdot X + A,$$

где $Q_{изв}$ — общий расход извести на 1 т стали, кг; A — расход извести на 1 т стали при использовании 100 % лома, кг; X — доля ГБЖ в шихте, %; y — содержание SiO_2 в ГБЖ, мас. %; $2 \cdot y/100/0{,}9 \cdot 1000$ — расход извести, кг, на 1 т стали при содержании CaO в извести 90 % и основности шлака 2.

Например, при содержании SiO_2 в ГБЖ 4,3 % и расходе извести при работе на 100 % ломе 47 кг/т расход извести с учетом добавки 15 % ГБЖ должен составлять 54,3 кг/т. Формула не учитывает приход CaO из других добавляемых флюсовых материалов.

Для получения оптимальных технологических показателей рекомендуется использовать свежеобожженную известь I сорта. Куски извести должны обладать достаточной прочностью, чтобы избежать их рассыпания при подаче в печь по конвейерной ленте и исключить вынос мелкой фракции в систему отвода отходящих газов.

3. ***Отдача MgO-содержащего флюса в ДСП*** осуществляется для создания шлака, насыщенного MgO для снижения его агрессивности по отношению к основной футеровке. В качестве магнийсодержащей флюсовой добавки могут использоваться магнезиально-известковый флюс или брикеты, доломитизированная известь, бой ПУ-огнеупоров и другие материалы, содержащие MgO. Отдача этих материалов должна осуществляться таким образом, чтобы обеспечить содержание MgO в шлаке на уровне 8–10 % на протяжении всей плавки.

4. ***Подварка (заправка) откосов ДСП и торкретирование***. Важно отметить, что стойкость кампании футеровки, а именно стойкость ПУ-футеровки печи, зависит в первую очередь от состояния откосов и подины печи, которые и являются основным рабочим слоем, на котором происходит плавка. В процессе эксплуатации печи необходимо постоянно контролировать уровень откосов и своевременно их подваривать (заправ-

лять). Заправка подины и откосов в процессе кампании печи должна осуществляться высокомагнезиальными массами с хорошими адгезионными свойствами. Помимо качественных связующих рекомендуемое содержание MgO в подварочных массах должно быть не менее 80 %, CaO на уровне 12–16 %. Отмечено, что при использовании подварочных масс с более низким содержанием MgO их расход значительно увеличивается. Это связано с растворением масс в жидкой ванне, о чем косвенно свидетельствует повышение содержания MgO в шлаке. После заправки откосов печи необходимо произвести выдержку печи (5–7 мин) перед завалкой, чтобы обеспечить гарантированное спекание заправочного материала.

В процессе эксплуатации печи необходимо своевременно торкретировать зоны повышенного локального износа рабочего слоя футеровки. По возможности не допускать оголения поверхности футеровки и поддерживать на ней защитный слой гарнисажа. Стойкость торкрет-слоя на футеровке должна составлять 3–5 плавок. Рекомендуемое содержание MgO в торкрет-массе не менее 85 %, SiO_2 не более 7 %.

Учитывая возрастающие тепловые нагрузки на футеровку ДСП при использовании ГБЖ рекомендуется поддерживать удельный расход заправочной и торкрет-массы на обслуживание футеровки в зависимости от доли ГБЖ на уровне: $Q_{мас} = A \cdot (1 + X / 100)$, где $Q_{мас}$ — расход подварочной массы на 1 т стали, кг; A — расход массы на 1 т стали при использовании 100 % лома, кг; X — доля ГБЖ в шихте, %.

5. ***Вспенивание шлака в течение плавки*** позволяет защитить рабочий слой футеровки, образовывая на нем слой гарнисажа, и обеспечить экранирование дуги, что положительно отражается на технико-экономических показателях плавки. Важно обеспечить такой химический состав шлака, чтобы он не только хорошо пенился при вдувании углерода, но и был совместим с магнезиальными огнеупорами. По опыту работ, проведенных при выплавке стали в ДСП на разных металлургических предприятиях, отмечено, что оптимальные показатели шлака, который обладает низким агрессивным воздействием на футеровку и обеспечивает формирование устойчивой шлаковой пены, следующие: MgO 8–10 %, основность 2,2–2,5 при содержании FeO 15–25 % [10, 13, 15].

6. ***Работа газокислородных фурм***. Рациональное распределение подачи кислорода через газокислородные фурмы позволяет обеспечить равномерный износ рабочего слоя футеровки печи по всему периметру. Рекомендуется проводить мероприятия по оценке воздействия работы фурм на локальный износ рабочего слоя футеровки и при необходимости перераспределять подачу кислорода в фурмы (увеличивать / уменьшать давление) либо изменять угол наклона для снижения воздействия на рабочий слой футеровки.

Выполнение предложенных рекомендаций позволит повысить текущую стойкость ПУ-футеровки печи до уровня более 1000 плавок.

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННЫХ РЕКОМЕНДАЦИЙ

Для оценки экономической эффективности предложенных рекомендаций был проведен анализ затрат на огнеупоры и вспомогательные материалы при использовании ГБЖ в завалке для фактического режима работы ДСП (апрель – май 2015 г.) и рекомендуемого. Результаты показаны на рис. 8. Стойкость футеровки ДСП за анализируемый период составила 670 плавок при средней доле ГБЖ в завалке 19 %. Прогнозируемая стойкость футеровки с учетом рекомендаций должна составить не менее 1000 плавок при доле ГБЖ в завалке 20 % и не менее 1200 плавок при работе на металлическом ломе. Данные стойкости были приняты для расчета затрат на огнеупоры и материалы (с учетом полученных стойкостей на других кампаниях ДСП). В расчет затрат включены затраты на ПУ-огнеупор для стен печи, набивную магнезиальную массу, расход извести, MgO-флюса, массу для подварки откосов и торкретирования стен печи. Затраты на эти материалы рассчитывали с учетом их стоимости на период эксплуатации печи в долларах США.

Из рис. 8 видно, что предложенные рекомендации по уходу за футеровкой печи позволят снизить экономические затраты на огнеупорные и вспомогательные материалы по сравнению с фактическими режимами обслуживания печи за анализируемый период. Экономический эффект от использования предложенных рекомендаций достигается за счет рационального режима обслуживания печи и поддержания состава шлака, более благоприятного для футеровки ДСП, что повышает ее стойкость. Следует отметить, что в представленные затраты не включены трудозатраты на промежуточный ремонт ДСП и простои оборудования, количество которых снижается при увеличении стойкости футеровки.

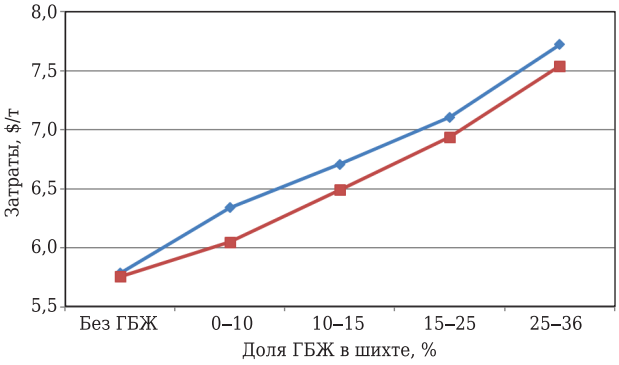

Рис. 8. Затраты на огнеупоры и вспомогательные материалы при разных режимах обслуживания печи: ◆ — фактические данные; ■ — данные, полученные при рекомендуемом режиме

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены анализ влияния добавки ГБЖ в завалке на стойкость ПУ-футеровки ДСП-150, расход магнезиальных масс на обслуживание печи и другие технологические показатели плавки при выплавке стали в ДСП, работающей на твердой завалке в условиях ПАО «ТАГМЕТ». Отмечено значительное снижение стойкости футеровки печи при использовании добавки ГБЖ.

Рассмотрены разные схемы порционной загрузки ГБЖ в печь. Оптимальным вариантом загрузки ГБЖ является послойная загрузка ГБЖ с металлическим ломом. Такая схема позволяет исключить образование крупных кластеров, состоящих из ГБЖ, которое может спекаться, образовывая крупные тугоплавкие глыбы и настыли. Загрузка металлошихты с долей ГБЖ 20–25 % затрудняет процесс выплавки стали, приводит к локальному перегреву ПУ-футеровки и способствует образованию крупных настылей на водоохлаждаемых панелях ДСП.

Проведен анализ изменения состава шлака при использовании ГБЖ. Разработаны предложения по совершенствованию отдачи шлакообразующих добавок и материалов для обслуживания ДСП-150 в условиях использования ГБЖ для повышения стойкости футеровки. Показан экономический эффект от внедрения предложенных рекомендаций.

Библиографический список

1. ***Grobler, F. R.*** The increasing role of direct reduced iron in global steelmaking / *F. R. Grobler, C. A. Minnitt* // South African Institute of Mining and Metallurgy Journal. — 1999. — № 3. — P. 111–116.

2. ***Трахимович, В. И.*** Использование железа прямого восстановления при выплавке стали / *В. И. Трахимович, А. Г. Шалимов*. — М. : Металлургия, 1982. — 248 с.

3. ***Elkader, M. A.*** Effect of direct reduced iron proportion in metallic charge on technological parameters of EAF steelmaking process / *M. A. Elkader, A. Fathy, M. Eissa, S. Shama* // ISIJ Int. — 2016. — Vol. 5, № 2. — P. 2016–2024.

4. ***Хассан, А. И.*** Анализ технологии выплавки стали с использованием в шихте металлизованных окатышей и HBI железа с повышенным содержанием фосфора / *А. И. Хассан, Г. И. Котельников, А. Е. Семин, Г. Мегахед* // Черные металлы. — 2015. — № 5. — С. 64-69.

5. ***Тимофеев, Е. С.*** Совершенствование энерготехнологического режима выплавки стали в ДСП-150 при использовании горячебрикетированного железа в завалке с целью повышения эффективности производства : дис. … канд. техн. наук. — М., 2007. — 147 с.

6. ***Люкхоф, Я.*** Использование различных видов металлошихты в электросталеплавильном производстве / *Я. Люкхоф, Й. Апфель, Й. Буттлер* // Черные металлы. — 2017. — № 10. — С. 28–33.

7. ***Коростелев, А. А.*** Анализ влияния добавки горячебрикетированного железа в завалке на технологические показатели плавки в электропечи / *А. А. Коростелев, Г. И. Котельников, А. Е. Семин* [и др.] // Черные металлы. — 2017. — № 10. — С. 33–40.

8. ***Бондаренко, И. А.*** Повышение стойкости футеровки тепловых агрегатов при использовании обожженного магнезиально-известкового флюса в условиях ОАО БМЗ / *И. А. Бондаренко, А. К. Турыгин, А. Л. Артамошин* [и др.] // Литье и металлургия. — 2013. — № 2. — С. 78–81.

9. ***Кожухов, А. А.*** Исследование условий и факторов образования вспененных шлаков в дуговой сталеплавильной печи / *А. А. Кожухов, А. Е. Семин, Г. И. Котельников* // Сб. тр. 13-го конгресса сталеплавильщиков. — 2014. — С. 93–98.

10. ***Бабенко, А. А.*** Химический и фазовый состав магнезиальных шлаков, формируемых в ДСП, и их роль в эффективности вспенивания шлака / *А. А. Бабенко, М. В. Ушаков, А. В. Мурзин* [и др.] // Сб. тр. 13-го конгресса сталеплавильщиков. — 2014. — С. 159–163.

11. ***Sanchez, J. L. G.*** Effect of foamy slag height on hot spots formation inside the electric arc furnace Based on a radiation model / *J. L. G. Sanchez, A. N. Conejo, M. A. Ramirez-Argaez* // ISIJ Int. — 2012. — Vol. 52, № 5. — P. 804–813.

12. ***Некрасов, И. В.*** Обзор исследований по шлаковому режиму электропечей / *И. В. Некрасов, О. Ю. Шешуков, А. А. Метелкин* [и др.] // Сталь. — 2016. — № 6. — С. 28–35.

13. ***Кожухов, А. А.*** Развитие научных основ вспенивания сталеплавильных шлаков с целью повышения энерготехнологических показателей производства стали в дуговых сталеплавильных печах : дис. докт. техн. наук. — М., 2016. — 335 с.

14. ***Зуев, М. В.*** Комплекс технологических и технических решений снижения энерго- и материалоемкости процесса выплавки стального полупродукта в современных ДСП / *М. В. Зуев, А. А. Бабенко, С. П. Бурмасов* [и др.] // Сб. тр. 13-го конгресса сталеплавильщиков. — 2014. — С. 54–58.

15. ***Красильников, В. О.*** Передовые технологии эксплуатации футеровки электросталеплавильной печи на примере ДСП-135 ОАО «Северский трубный завод» / *В. О. Красильников, Л. В. Зубаков, М. В. Ушаков* [и др.] // Сталь. — 2014. — № 6. — С. 31–34.

16. ***Кащеев, И. Д.*** Химическая технология огнеупоров / *И. Д. Кащеев, К. К. Стрелов, П. С. Мамыкин*. — М. : Интермет Инжиниринг, 2007. — С. 256–275.

17. ***Хорошавин, Л. Б.*** Магнезиальные огнеупоры / *Л. Б. Хорошавин, В. А. Перепелицын, В. А. Кононов*. — М. : Интермет Инжиниринг, 2001. — 576 с.

18. ***Стариков, В. С.*** Огнеупоры и футеровки в ковшевой металлургии / *В. С. Стариков, М. В. Темлянцев, В. В. Стариков*. — М. : МИСиС, 2003.

19. ***Кащеев, И. Д.*** Оксидноуглеродистые огнеупоры / *И. Д. Кащеев*. — М. : Интермет Инжиниринг, 2000. — 265 с. ■

Получено 11.12.17
© А. А. Коростелёв, Н. С. Съёмщиков, А. Е. Сёмин, Г. И. Котельников, И. С. Мурзин, В. В. Емельянов, Е. А. Колоколов, С. С. Белоножко, 2018 г.