

Федеральное Государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(НИТУ «МИСиС»)

Коростелев Алексей Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГОРЯЧЕБРИКТИРОВАННОГО ЖЕЛЕЗА В
МЕТАЛЛОШИХТЕ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПЛАВКИ С
ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ В
ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Специальность 05.16.02 - «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., профессор
Семин А.Е.

Москва - 2019 г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время на металлургическом рынке на фоне повышения требований к качеству электростали наблюдается снижение качества амортизационного лома, что приводит к возрастанию спроса на металлизированное сырье, в частности на горячебрикетированное железо (ГБЖ). Использование ГБЖ при выплавке стали в дуговой сталеплавильной печи (ДСП) обеспечивает дополнительные возможности выплавки особо чистых высококачественных и специальных сталей, поскольку качество получаемого полупродукта по содержанию вредных примесей выше, чем при использовании 100% металлического лома. ГБЖ имеет более благоприятные условия транспортирования и хранения по сравнению с ломом.

При выплавке полупродукта в ДСП в последнее время на металлургических заводах России применяют добавку ГБЖ производства ОАО “Лебединский ГОК” в металлошихту, что отражается на технико-экономических показателях плавки, в том числе и на стойкости футеровки. Преимущества использования такого сырья хорошо известны, но не в полной мере освещаются проблемы, связанные с его использованием, ограничена информация об особенностях работы с таким сырьем. Нет единого мнения о влиянии ГБЖ на технологические показатели электроплавки – расходы 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 других. При этом ряд предприятий используют этот материал в различном соотношении с ломом и чугуном. Решения по этим вопросам требуют анализа имеющегося опыта. Мало изучено влияние повышенной доли ГБЖ на состояние футеровки большегрузной ДСП, окисленность системы в печи, отсутствуют стандартные рекомендации по ведению шлакового режима при использовании ГБЖ.

Это обуславливает целесообразность системного изучения особенностей применения перспективного материала – ГБЖ в металлошихте дуговых электропечей, работающих на твердой завалке. Развитие исследований в этом направлении позволит повысить эффективность производства высококачественной стали при использовании ГБЖ в металлошихте. Работа, нацеленная на выявление значений технологических параметров, приводящих к повышению технико-экономических показателей процессов и повышение качества получаемого металла является актуальной.

При подготовке данной работы **теоретической основой** послужили труды, связанные с получением и использованием металлизированного сырья при производстве стали, а также с влиянием шлакового режима на показатели плавки и огнеупорную футеровку печи, изложенные в публикациях таких авторов, как Трахимович В.И.,

Шалимов А.Г., Меркер Э.Э., Смирнов Л.А., Бигеев В.А., Кожухов А.А., Красильников В.О., Кац Л.Н., Еланский Г.Н., Дуб В.С., Аксельрод Л.М., Бабенко А.А., Шешуков О.Ю., Вдовин К.Н., Паршин В.М., Тимофеев Е.С., Рошин В.Е., Усачев А.Б. и другие.

Целью диссертационной работы является исследование влияния добавки ГБЖ в металлошихту на технологические показатели плавки и стойкость футеровки ДСП повышенной вместимости, работающей на твердой завалке и имеющей порционную загрузку шихты с целью повышения эффективности производства стали.

Для достижения этой цели были поставлены следующие **основные задачи**:

1. Изучить механизм плавления металлошихты, содержащую в своем составе ГБЖ.
2. Исследовать взаимодействие расплава с футеровкой печи при включении в металлошихту разной доли ГБЖ.
3. Оценить изменение энерготехнологических показателей плавки и содержание примесей в полупродукте при увеличении доли ГБЖ в шихте.
4. Исследовать влияние ГБЖ на состав шлака в печи и разработать мероприятия по повышению эффективности производства стали в ДСП-150, включая увеличение стойкости футеровки.
5. Разработать рекомендации по оптимальной схеме загрузки металлошихты, состоящей из лома и ГБЖ, позволяющей повысить эффективность периода плавления.
6. Провести оценку экономической и технической эффективности использования ГБЖ в зависимости от его доли в шихте.

Научная новизна:

1. Установлено, что при включении в металлошихту, содержащую в качестве основного компонента металлический лом, более 25-30% брикетов железа прямого восстановления, сконцентрированных в локальных зонах, образуется конгломерат, состоящий из непроплавившейся шихты (брикеты, лом, известь, кокс), заключенной в тугоплавкую пористую твердую корочку. Механизм образования корочки заключается в частичном расплавлении ГБЖ с образованием пористого оксидного твердого раствора с повышенной основностью и пониженной теплопроводностью. В связи с чем в целом конгломерат обладает низкой скоростью проплавления из-за низкой плотности и пониженной теплопроводности.

2. Установлено влияние доли ГБЖ на окисленность системы (металла и шлака) и получена количественная зависимость между конечным содержанием углерода в полупродукте и долей ГБЖ в металлошихте при одинаковой длительности периода расплавления, совмещенного с окислительным. Увеличение доли ГБЖ приводит к

повышению окисленности металла и шлака, что обуславливает снижение углерода в металле.

3. Показано, что при доле ГБЖ в шихте на уровне 10-20 % при отдаче его по периферии ванны печи на футеровке происходит образование защитного гарнисажного слоя повышенной толщины, состоящего из непроплавившегося ГБЖ в смеси с нерастворившимися известью, коксом и ломом.

4. Установлено, что на неравномерный износ футеровки и образование гарнисажа влияет изменение основности и окисленности шлака, а также увеличение его количества, вызванное наличием значительного содержания в металлошихте пустой породы и оксидов железа.

5. Показано, что снижение стойкости футеровки печи при увеличении доли ГБЖ связано с ростом тепловой нагрузки, вызванной увеличением количества шлака, а также с повышением его окисленности и снижением основности.

Практическая значимость результатов работы:

1. Предложена схема распределения металлошихты, состоящей из ГБЖ и металлического лома в завалочной корзине, которая позволяет снизить или устранить эффект образования массивных тугоплавких конгломератов, так как локально расплавившееся ГБЖ с образованием большей доли жидкой ванны стимулирует процесс растворения и проплавления лома. Показано, что наиболее рациональной является послойная загрузка ГБЖ в корзину совместно с ломом, при этом доля ГБЖ не должна превышать 25-30 %.

2. Предложена методика оценки затрат на производство полупродукта с учетом замены традиционно используемой шихты (металлический лом и передельный чугун) на ГБЖ в различном объеме включая оценку изменения затрат на энергоресурсы и вспомогательные материалы.

3. Разработаны рекомендации по усовершенствованию режима отдачи шлакообразующих и огнеупорных материалов с целью поддержания заданной стойкости футеровки ДСП-150. Отмечено, что использование защитного гарнисажа позволит увеличить срок службы футеровки и повысить технико-экономические показатели плавки.

4. Рекомендации, направленные на повышение стойкости футеровки печи и оптимизации шлакового режима были опробованы при выплавке полупродукта в ДСП-150 в условиях АО «ВТЗ» и ПАО «ТАГМЕТ», что подтверждено актами. Данные рекомендации показали положительный эффект и применяются в настоящее время. Разработанные рекомендации могут быть использованы при выплавке полупродукта на

других электропечах, использующих добавку ГБЖ и имеющих порционную загрузку твердой шихты.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты данной работы доложены и обсуждены на международной научной конференции “Физико-химические основы металлургических процессов” (г. Москва, ИМЕТ РАН, 2017 г.), на XVI международной конференции огнеупорщиков и металлургов (г. Москва, НИТУ “МИСиС”, 2018 г.), на XV международном конгрессе сталеплавильщиков и производителей металла (г. Тула, 2018 г.).

На защиту выносятся:

1. Механизм плавления металлошихты, содержащей в своем составе более 20 % ГБЖ при производстве полупродукта в ДСП-150. Особенности выплавки стали при повышенной доле ГБЖ.
2. Экспериментальные и теоретические данные о влиянии комплексной металлошихты, состоящей из лома и ГБЖ, на основные технико-экономические показатели процесса выплавки стали в ДСП, включая стойкость футеровки печи и расход огнеупорных материалов для ее обслуживания.
3. Анализ вариантов комплектации металлошихты в завалке, состоящей из лома и ГБЖ при порционной загрузке материалов в ДСП с целью повышения эффективности расплавления шихты.

Личный вклад автора: непосредственное участие автора в получении экспериментальных данных и проведении плавов с использованием ГБЖ в шихте. Теоретический анализ влияния доли ГБЖ на показатели плавки. Подготовка публикаций по данной работе.

Достоверность результатов работы. Анализ экспериментальных данных при проведении промышленных плавов с использованием ГБЖ подтверждает их соответствие расчетным показателям. Используемый массив данных промышленных плавов (более 100 плавов по каждому предприятию - АО «ВТЗ» и ПАО «ТАГМЕТ») позволяет обоснованно судить о достоверности полученных результатов и сделанных на их основе выводах. Температуру металла, химический анализ металла и шлака, расходы материалов и другие показатели определяли на действующем на период проведения анализируемых плавов современном оборудовании металлургических предприятий АО «ВТЗ» и ПАО «ТАГМЕТ».

Текст диссертации и автореферата проверен на отсутствие плагиата с помощью программы “Антиплагиат” (<https://antiplagiat.ru>).

Структура и объем диссертационной работы. Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 195 наименований и 3 приложений. Диссертация изложена на 184 страницах машинописного текста, содержит 29 таблиц и 112 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность диссертационной работы, представлены цель и основные задачи работы, сформулирована ее научная новизна и практическая значимость, представлены положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации результатов работы.

В **первой главе** приведен аналитический обзор литературы по тематике исследования. Рассмотрены основные технологические приемы, направленные на повышение эффективности производства стали в ДСП. При этом отмечено, что большое внимание металлурги уделяют качеству производимого металла. Горячебрикетированное железо относится к одному из видов металлизированного 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.

Показана важность такого технологического решения, как формирование пенистых магнезиальных шлаков при производстве полупродукта в печи. Данные шлаки обладают низким агрессивным воздействием на футеровку ДСП и высокими рафинирующими свойствами, что позволяет повысить эффективность производства стали.

Использование металлизированного сырья, в том числе ГБЖ, оказывает влияние на протекание процесса обезуглероживания металла и формирование шлака, что в итоге отражается на технико-экономических показателях плавки. Рассмотрены различные типы металлизированного сырья и показано, что на показатели плавки влияют такие характеристики металлизированного сырья, как содержание в нем углерода, оксидов железа, пустой породы, плотность. Описаны различные способы загрузки металлизированного сырья в малотоннажные печи и их влияние на технологические показатели, в том числе на стойкость футеровки печи. Приведены преимущества и недостатки при производстве полупродукта в условиях использования ГБЖ.

К основным проблемам и недостаткам, которые возникают при выплавке стали в ДСП с использованием ГБЖ можно отнести следующие:

- как правило, отмечается повышение расхода энергоносителей и шлакообразующих;
- снижение стойкости футеровки печи и увеличение расхода огнеупорных материалов для ее обслуживания;
- увеличение времени плавки и снижение выхода годного.

Изменение энерготехнологических показателей плавки и стойкости футеровки печи обусловлено наличием пустой породы в металлизированном сырье и оксидов железа, которые требуют дополнительных затрат энергии для их восстановления.

Тем не менее, несмотря на ухудшение некоторых технологических показателей плавки, использование ГБЖ в металлошихте остается перспективным.

В литературе ограничено количество исследований, направленных на изучение влияния ГБЖ на показатели плавки при выплавке полупродукта в большегрузных ДСП,

имеющих порционную загрузку, а также отсутствуют стандартные приемы и рекомендации по работе с таким сырьем.

В связи с этим, с целью повышения эффективности производства стали при использовании ГБЖ, на примере ДСП-150, работающих на твердой завалке и имеющих порционную загрузку шихты были поставлены следующие основные задачи: изучить механизм плавления металлошихты, содержащей в своем составе ГБЖ, исследовать взаимодействие расплава с футеровкой печи при включении в металлошихту разной доли ГБЖ, а также оценить изменение энерготехнологических показателей плавки и содержание примесей в полупродукте, исследовать влияние ГБЖ на состав шлака в печи и разработать мероприятия по повышению эффективности производства стали в ДСП-150, включая увеличение стойкости футеровки, разработать рекомендации по оптимальной схеме загрузки металлошихты, состоящей из лома и ГБЖ, позволяющей повысить эффективность периода плавления, провести оценку экономической и технической эффективности использования ГБЖ в зависимости от его доли в шихте.

На основании результатов исследования необходимо предложить решения по усовершенствованию режима ведения плавки.

Во второй главе представлена методика исследования технологии выплавки стали в ДСП на примере схемы ДСП-150 ПАО «ТАГМЕТ» (ТАГМЕТ). Представлены основные характеристики печи и требования к производимому полупродукту. Печь оборудована 4-мя кислородными модулями, 4-мя инжекторами для вдувания углеродсодержащего порошка, 3-мя инжекторами для дожигания СО и одной горелкой в рабочем окне. Выпуск шлака осуществляют через рабочее окно печи. Выпуск металла осуществляют с использованием эркерного затвора с диаметром выпускного канала 140 мм.

Дальнейший цикл производства стали включает последующую внепечную обработку металла в сталеразливочном ковше на установке Ковш-Печь и вакуумирование.

В качестве добавки в металлошихту используют ГБЖ. Размер брикета 110*50*30 мм, плотность - 5 г/см³. Степень металлизации ГБЖ составляет 93,1%. Типовой химический состав ГБЖ, представлен в таблице 1.

Таблица 1. Типичный химический состав ГБЖ, %.

С	S	P	SiO ₂	Fe _{общ}	Fe _{мет.}
1,04	0,006	0,012	4,3	90,6	84,4

Содержание примесей цветных металлов в ГБЖ (Cu, Ni, Cr и др.) не нормируется. Важно отметить высокое содержание диоксида кремния в ГБЖ, который значительно понижает основность шлака при увеличении добавки ГБЖ в шихте. Содержание оксидов железа в ГБЖ находится на уровне 8 %.

В качестве металлического лома используют, как правило, лом группы АЗ.

Типовая технологическая схема загрузки ГБЖ совместно с металлическим ломом представлена в таблице 2. При плавке осуществляют одну завалку шихты и две подвалки. ГБЖ загружают при помощи коробов в 1-ю завалочную корзину послойно совместно с

ломом. Общее количество металлошихты в завалке составляет около 155 т. Максимальное количество ГБЖ на плавку - 50 т. Долю ГБЖ на плавку определяли в зависимости от требуемого содержания меди в полупродукте.

Таблица 2. Распределение металлошихты в загрузочные корзины.

Номер бадьи	Тип металлошихты	Количество
ЗАВАЛКА (90 тонн)		
Корзина 1	лом категории 15А, 16А (стружка)	10-15 т
	ГБЖ	20 т
	лом категории 3АН, 3АН-1, 3АЭ (лом и отходы кусковые)	10-20 т
	ГБЖ	15-20 т
	лом категории 3АН, 3АН-1, 3АЭ (лом и отходы кусковые)	10-20 т
	ГБЖ	0-10 т
	лом категории 3АН, 3АН-1, 3АЭ (лом и отходы кусковые)	0-10 т
ПОДВАЛКА 1 (40 тонн)		
Корзина 2	лом категории 15А, 16А (стружка)	5 т
	лом категории 3А (лом и отходы кусковые)	15-20 т
	лом категории 3АН, 3АН-1, 3АЭ (лом и отходы кусковые)	15-20 т
ПОДВАЛКА 2 (25 тонн)		
Корзина 3	лом категории 15А, 16А (стружка)	5 т
	лом категории 3АН, 3АН-1, 3АЭ (лом и отходы кусковые)	20 т
Итого металлошихты на плавку: 155 тонн		

Совместно с металлошихтой в корзины загружают известь и антрацит.

Плавку ведут согласно плановому энерготехнологическому режиму используя газокислородные горелки. В конце окислительного периода производят замер температуры стали и отбор пробы металла и шлака.

Анализ пробы металла проводили с использованием эмиссионного спектрометра. Анализ шлака проводили с использованием рентгенофлуоресцентного метода.

При анализе плавов осуществляли контроль технологических параметров в течение всей кампании печи от монтажа футеровки до ее демонтажа. В процессе работы проводили следующие мероприятия:

- контроль монтажа рабочего слоя футеровки;
- сбор данных по расходу и типу загружаемых шихтовых материалов;
- контроль энерготехнологических показателей плавки;
- оценка состояния шлака в печи, сбор данных по расходам шлакообразующих материалов в процессе эксплуатации;
- оценка состояния футеровки в процессе эксплуатации ДСП, фиксирование замечаний и зон повышенного износа футеровки;
- контроль расхода огнеупорных материалов для обслуживания футеровки печи;
- анализ топографии износа при демонтаже футеровки.

Анализ плавов с использованием ГБЖ также проводили при выплавке полупродукта в ДСП-150 ВТЗ, которая имеет схожие с ДСП-150 ТАГМЕТ характеристики.

В третьей главе приведены данные анализа влияния добавки ГБЖ на технологические показатели плавки в ДСП-150 - расход энергоресурсов, содержание примесей в полупродукте, исследован механизм плавления металлошихты, содержащей ГБЖ, рассмотрены различные способы порционной загрузки ГБЖ в печь.

При изучении механизма плавления металлошихты, содержащей в своем составе более 25-30% ГБЖ обнаружено, что в жидкой ванне образуется тугоплавкий конгломерат, представляющий собой непроплавившуюся часть ГБЖ, лома и шлакообразующих, обладающий пониженной скоростью плавления. Механизм образования конгломерата заключается в первоначальном расплавлении ГБЖ с образованием на поверхности конгломерата тугоплавкой корочки (рис. 1), представляющую собой оксидный раствор с высокой основностью, обладающий повышенной пористостью и пониженной теплопроводностью, имеющий повышенную температуру плавления, что значительно снижает скорость проплавления шихты. Это приводит к тому, что перед выпуском полупродукта конгломерат остается в печи нерасплавленным.

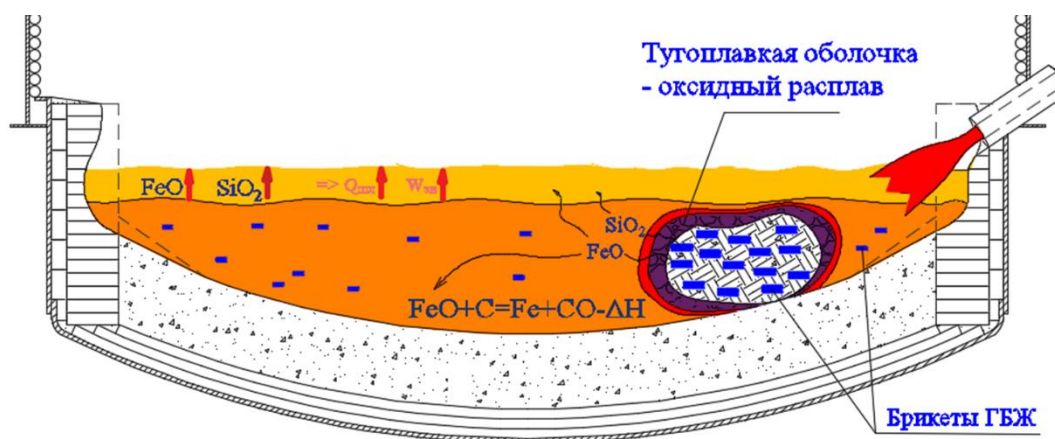


Рис. 1. Образование конгломерата в ванне печи при доле ГБЖ в шихте более 25%.

Анализ химического состава образовавшейся вокруг конгломерата тугоплавкой пористой оболочки, проведенный с использованием рентгенофлуоресцентного метода приведен в табл. 3. Отмечено высокое содержание в ней CaO. Тугоплавкая пористая оболочка снижает скорость плавления конгломерата.

Таблица 3. Химический состав пробы корочки конгломерата, извлеченного из печи.

Хим. состав внешней оболочки конгломерата, %						Основность
FeO	CaO	SiO ₂	MgO	MnO	Ti ₂ O ₃	(CaO+MgO)/SiO ₂
42,0	33,5	13,2	5,5	5,6	0,4	2,95

На рис. 2 представлен тугоплавкий конгломерат массой около 2,5 т, образовавшийся в ДСП-150, приварившийся к стенам футеровки и извлеченный после окончания кампании футеровки печи.

Внутри, как видно, конгломерат состоит из нерасплавившихся компонентов завалки – ГБЖ, металлический лом, известь, кокс.



Рис. 2. Компоненты конгломерата, извлеченного из ДСП после окончания кампании футеровки печи.

При отдаче значительного количества ГБЖ (более 30%, около 50 т) зафиксировано образование массивных конгломератов в ванне печи, которые можно было наблюдать после выпуска плавки.

Наружная оболочка конгломерата - твердый оксидный раствор, обладающий высокой температурой плавления и имеющий повышенную пористость. Образцы наружной металлической корочки представлены на рис. 3.



Рис. 3. Образцы наружной оболочки конгломерата, извлеченного из ДСП после окончания кампании футеровки печи.

Согласно диаграммам состояния оксидных систем $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO}$ и $\text{MgO-SiO}_2\text{-FeO}$ добавка CaO и MgO приводит к увеличению температуры плавления этих систем, поэтому отдача извести и MgO -содержащего флюса совместно с ГБЖ при первой завалке не рекомендуется.

Образование крупных тугоплавких конгломератов в печи связано в первую очередь с отдачей большого количества ГБЖ в металлошихте при порционной загрузке (более 30%), разделением шихты на отдельные кластеры, содержащие преимущественно ГБЖ. Традиционного времени плавки недостаточно для полного расплавления образовавшихся конгломератов, а увеличение длительности плавки приводит к локальному перегреву огнеупорной футеровки и снижению ее общей стойкости. Учитывая проблемы, возникающие при загрузке большой доли ГБЖ, были рассмотрены разные способы его порционной подачи в печь через завалочную бадью (рис. 4).

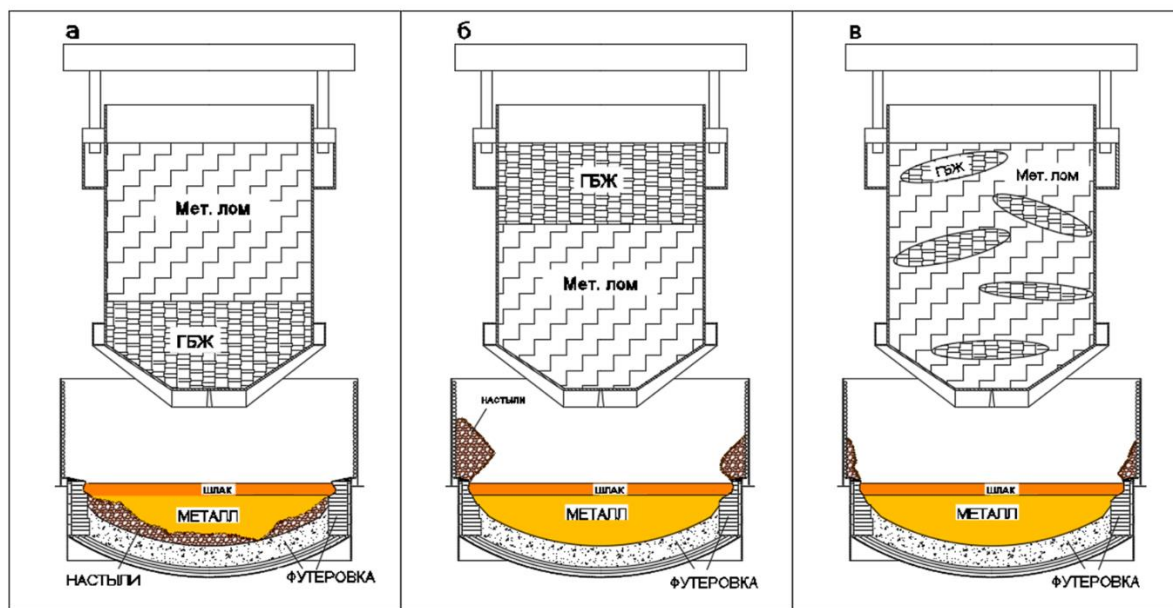


Рис. 4. Способы загрузки ГБЖ и металлического лома в ДСП-150.

При загрузке ГБЖ в нижнюю часть завалочной бадьи (рис. 4а) на подине печи образуются наросты, состоящие из спекшегося ГБЖ. От плавки к плавке объем зарастания подины печи увеличивается, что уменьшает объем жидкой ванны. Плановая длительность плавки не позволяет расплавить сформировавшиеся наросты и приводит к уменьшению объема жидкой ванны.

При загрузке ГБЖ в верхнюю часть бадьи (рис. 4б) над поверхностью зеркала металла формируются крупные кластеры, состоящие из спекшегося ГБЖ, которые привариваются к футеровке стен и водоохлаждаемым панелям печи, образуя на них настывы. После выпуска плавки из печи такие настывы, под воздействием собственного веса могут обрушиться в ванну печи, увлекая за собой и разрушая кирпичную футеровку стен, что может привести к аварийной ситуации.

Послойный способ загрузки ГБЖ и металлического лома оказался оптимальным вариантом отдачи сырья (рис. 4в), который позволяет снизить или устранить эффект образования массивных тугоплавких конгломератов, так как локально расплавившееся ГБЖ с образованием большей доли жидкой ванны стимулирует процесс растворения и проплавления лома.

Тем не менее, даже при послойном способе загрузки шихты при доле ГБЖ более 30% возможно образование крупных настывов на стенах и подине печи. Отсутствие

достаточного количества тепла в локальных зонах ДСП не позволяет расплавить настывшие, образовавшиеся выше шлакового пояса и способствует перегреву и повышенному износу футеровки в шлаковом поясе.

Также, в процессе проведения работы обнаружена возможность (при доле ГБЖ на уровне 10-20%) создания на футеровке ДСП гарнисажного слоя, содержащего в своем составе ГБЖ, что позволяет защитить футеровку печи, повысить ее стойкость и снизить расход огнеупорных материалов для ее обслуживания. Создание такого гарнисажного слоя может достигаться определенным режимом ведения плавки, способом загрузки ГБЖ в печь и другими мероприятиями, что требует более детального изучения.

Анализ массива плавок показал, что при увеличении доли ГБЖ содержание углерода в полупродукте находилось на более низком уровне, а содержание FeO в шлаке на более высоком уровне при одинаковом времени плавки. При анализе массива плавок с использованием добавки ГБЖ, при выплавке стали в ДСП-150 в условиях ЭСПЦ ВТЗ отмечено, что среднее содержание углерода в полупродукте при увеличении доли ГБЖ снижается с 0,08 до 0,06 % (рис. 5). Для построения зависимости использовали программный пакет STATISTICA. На графике показаны интервалы с доверительной вероятностью 95%. Коэффициент корреляции составляет $r = -0,3683$ при уровне значимости $p < 0,05$, что свидетельствует об умеренной зависимости.

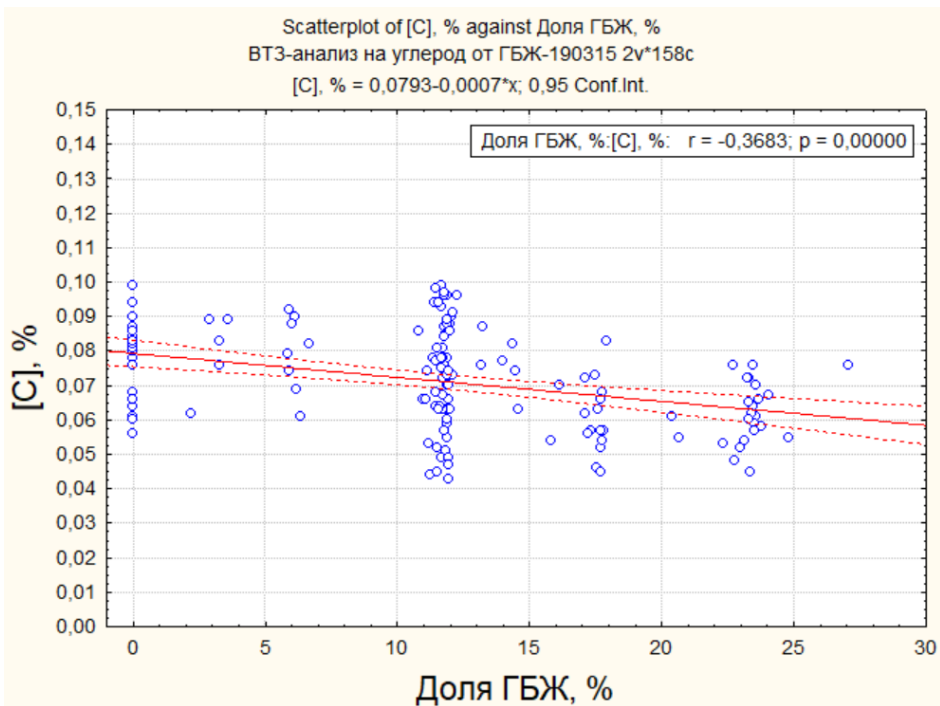


Рис. 5. Содержание углерода в полупродукте в зависимости от доли ГБЖ в шихте.

При этом среднее содержание оксидов железа в шлаке при введении добавки ГБЖ увеличивалось с 24 до 30 %. Однако, повышение окисленности шлака более 35-40 % (FeO) по мнению ряда исследователей приводит к затруднению его вспенивания и повышению расхода электроэнергии.

Дополнительно был проведен анализ на окисленность полупродукта в зависимости от доли ГБЖ в шихте (рис. 6), который показал, что при увеличении доли ГБЖ в шихте окисленность стали возрастает. Добавка ГБЖ в шихту позволяет достигать более низких значений содержания углерода в стали и, соответственно более высоких значений окисленности за одно и то же время плавки, что открывает возможность снижения расхода кислорода в конце окислительного периода, длительности плавки и увеличения производительности ДСП.

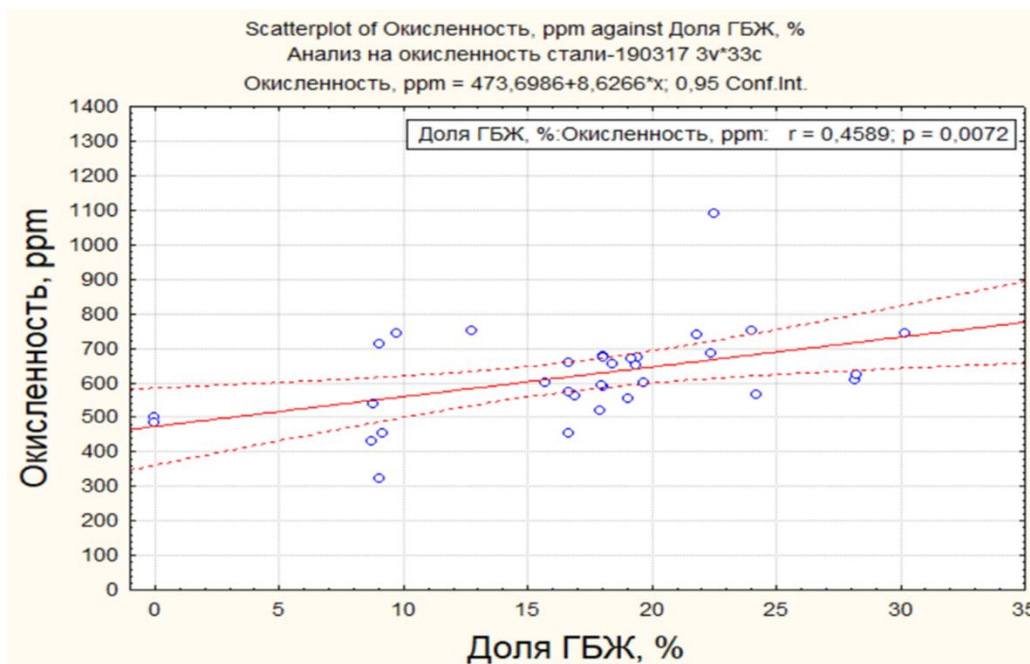


Рис. 6. Окисленность полупродукта в зависимости от доли ГБЖ в шихте.

Анализ содержания углерода в ГБЖ показывает, что для полного восстановления оксидов железа из ГБЖ необходимо иметь 1,3% углерода в ГБЖ. По факту, количество углерода в применяемом ГБЖ составляет около 1 %, что на 30% меньше. Это приводит к повышению окисленности жидкой ванны и требует дополнительного введения углеродсодержащих материалов.

Снижение расхода кислорода в конце плавки позволит обеспечить требуемое содержание углерода в металле на выпуске и положительно отразиться на технико-экономических показателях плавки. Для обеспечения хорошего вспенивания шлака и снижения расхода электроэнергии рекомендуется удерживать общую окисленность шлака не более 25 % ($\text{FeO} < 25\%$).

Анализ массива плавок, проведенных в условиях ЭСПЦ ВТЗ на ДСП-150 показывает, что при увеличении доли ГБЖ в шихте содержание примесей цветных металлов в полупродукте снижается, что связано в первую очередь с чистотой ГБЖ по данным примесям, таким как медь, олово, никель, хром и др. При увеличении доли ГБЖ в шихте с 0 до 27% среднее содержание меди в металле уменьшается с 0,21% до 0,15%, олова с 0,009% до 0,007%, никеля с 0,12% до 0,08%, хрома с 0,12% до 0,05%. Но, учитывая большой разброс показателей, обусловленный колебанием примесей в

металлическом ломе была предложена методика оценки плотности распределения примесей цветных металлов в полупродукте в зависимости от доли ГБЖ в шихте с использованием функции нормального распределения примесей в исходных шихтовых материалах. Например, на графиках на рис.7. представлена плотность вероятности распределения меди в ГБЖ, в металлическом ломе (сумма разных видов лома) и в получаемом полупродукте при использовании различной доли ГБЖ в шихте.

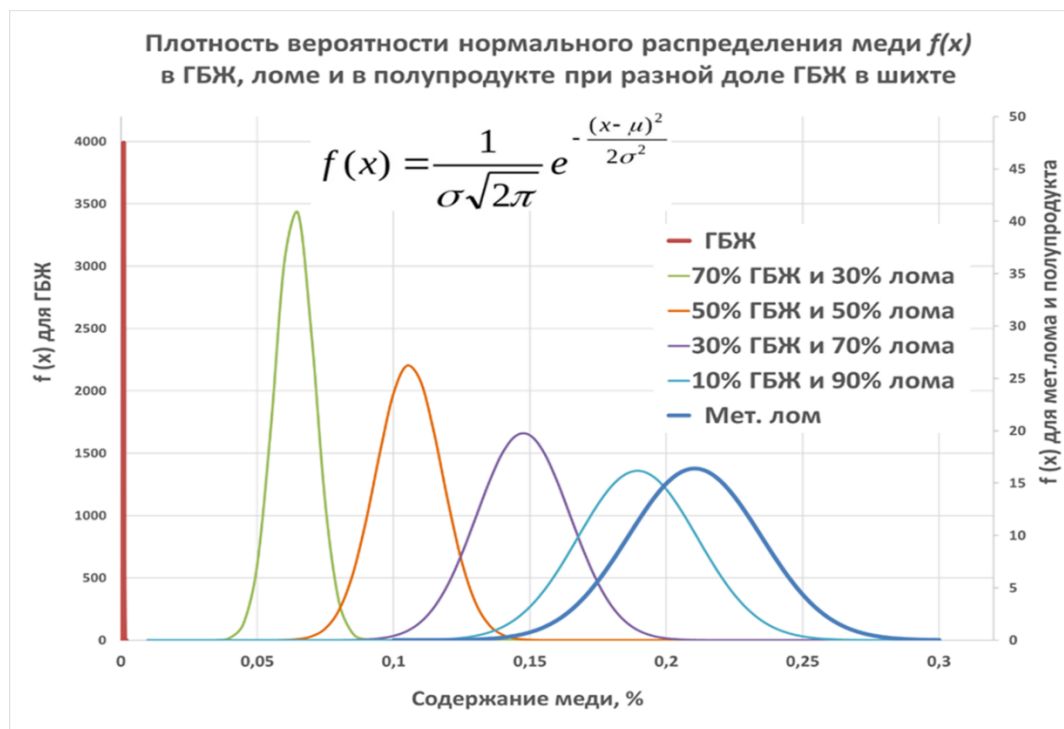


Рис. 7. Плотность вероятности нормального распределения меди в полупродукте при разной доле ГБЖ в шихте.

Использование данной методики позволит прогнозировать риски, связанные с отклонением химического состава стали по примесям цветных металлов при производстве полупродукта.

Анализ плавов (107 плавов), проведенный при выплавке полупродукта в ДСП-150 ТАГМЕТ показывает, что среднее содержание азота в полупродукте снижается с 0,0091 % до 0,0069 % при увеличении доли ГБЖ с 0 до 36 %. Содержание азота на выпуске стали из ДСП определяется соотношением двух процессов – поглощения и удаления газов в процессе выплавки стали. Удаление азота из металла происходит в процессе обезуглероживания за счет его экстракции пузырьками СО. Снижение содержания азота при увеличении доли ГБЖ связано с увеличением количества образующегося оксида углерода. При расчете текущей равновесной концентрации азота при обезуглероживании использовали формулу Геллера:

$$[N]_к = (28 * \Delta C / (12 * P_{общ} * K^2_{N_2}) + 1 / [N]_н)^{-1} \quad (1)$$

где ΔC – количество окисленного углерода, которое включает углерод, поступающий с ГБЖ, металлическим ломом, коксом и углеродсодержащими материалами. Очевидно, что общее количество окисленного углерода будет расти при увеличении доли ГБЖ в завалке.

Снижение содержания азота в стали при увеличении доли металлизированного сырья в шихте также отмечено и в других работах.

Одной из задач в данной работе была оценка распределения фосфора между шлаком и металлом и анализ процесса дефосфорации при использовании ГБЖ с низким содержанием фосфора. Для этого воспользовались обычно применяемой реакцией, описывающей процесс дефосфорации и ее энергией Гиббса:



Константа равновесия этой реакции имеет вид:

$$K_p = (a_{PO_{2,5}} \cdot a^{5/2}_{Fe}) / (a_{[P]} \cdot a^{5/2}_{FeO}) = (x_{P5+} \cdot \gamma_{P5+}) / ([P] \cdot f_P \cdot a^{5/2}_{FeO}) \quad (3)$$

После преобразований данное выражение примет вид $K_p = (P)/[P] \cdot \gamma_{P5+} / (31 \cdot \sum n_i \cdot f_P \cdot a^{5/2}_{FeO})$, отсюда коэффициент распределения фосфора:

$$L_p = (P) / [P] = (31 \cdot K_p \cdot \sum n_i \cdot f_P \cdot a^{5/2}_{FeO}) / \gamma_{P5+} \quad (4)$$

Расчет коэффициентов активностей определяли с использованием теории регулярных ионных растворов. Конечное содержание фосфора в металле рассчитывали с использованием балансового уравнения, которое после преобразований имело вид:

$$[P]_к = [P]_н / (1 + \lambda \cdot L_p) \quad (5)$$

где $\lambda = m_{шл} / m_{ме}$ – кратность шлака.

Начальное содержание фосфора в зависимости от доли ГБЖ примем:

$$[P]_н = 0,012 \cdot D + 0,025 \cdot (1-D) \quad (6)$$

где D – доля ГБЖ в завалке.

На рис. 8 представлено фактическое и равновесное содержание фосфора в полупродукте в зависимости от доли ГБЖ в шихте, содержащего не более 0,015% фосфора. Анализ проводили на массиве плавов (201 плавка), произведенных в ДСП-150 ВТЗ.

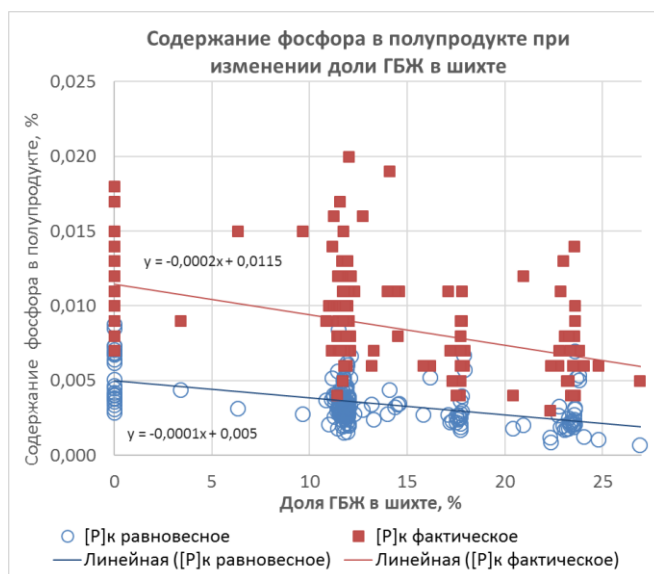


Рис. 8. Содержание фосфора в полупродукте в зависимости от доли ГБЖ в шихте.

Из рис. 8 видно, что происходит снижение (в два раза) фактического содержания фосфора в металле с 0,012 % до 0,006 % при увеличении доли ГБЖ в шихте с 0 до 27 %. Равновесное содержание фосфора, рассчитанное по формуле (5) также снижается. Разброс

данных обусловлен нестабильным содержанием фосфора в металлическом ломе, нестабильностью шлакового режима и малым временем его формирования.

В работе приведены результаты анализа влияния ряда технологических параметров, таких как доля ГБЖ в металлошихте, температура металла, основность и окисленность шлака на коэффициент распределения фосфора между шлаком и металлом. Причем данные промышленных плавов представлены в сравнении с расчетными. Следует отметить, что общие закономерности распределения фосфора соблюдаются, однако существуют и отличия фактических результатов от расчетных. Например, как видно из рис. 9 распределение фосфора между шлаком и металлом при увеличении основности шлака подчиняется законам термодинамики, но степень достижения равновесия уменьшается, что связано с кинетикой протекания процесса дефосфорации. С увеличением основности шлака повышается его вязкость и времени плавки недостаточно для полного растворения извести, добавляемой для поддержания основности шлака, и реакция образования фосфатов кальция протекает не в полной мере.

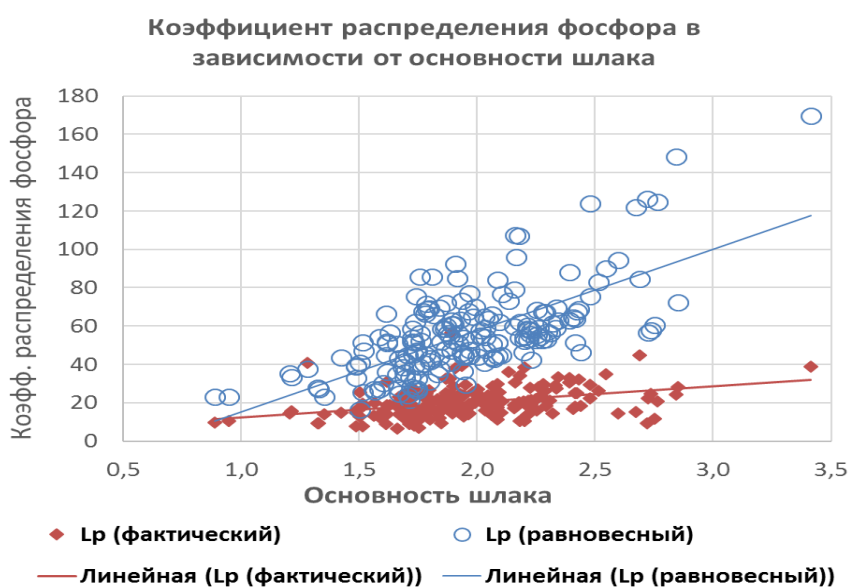


Рис. 9. Коэффициент распределения фосфора между шлаком и металлом при использовании ГБЖ в шихте в зависимости от основности шлака.

Равновесный коэффициент распределения фосфора между шлаком и металлом рассчитывали по формуле (4), фактический коэффициент распределения фосфора рассчитывали по формуле:

$$L_{\text{ф}} = (\text{P}_2\text{O}_5) * (62/142) / [\text{P}] \quad (7)$$

В связи с повышенным количеством образующегося шлака процесс распределения фосфора при увеличении доли ГБЖ становится менее стабильным, что отражается на разбросе показателей.

Анализ плавов, проведенных в условиях ЭСПЦ ВТЗ и ТАГМЕТ показал, что добавка ГБЖ в металлошихту приводит к изменению энерготехнологических показателей плавки. Для анализа влияния ГБЖ на показатели плавки при выплавке полупродукта в ДСП-150 ВТЗ использовали два массива плавов, произведенных в разные отчетные периоды:

1. Массив, состоящий из 49 плавов, выполненных с использованием 100% металлического лома;

2. Массив, состоящий из 201 плавки, выполненных с использованием ГБЖ (средняя доля ГБЖ – 12,9 %, максимальная – 27% (40 тонн)).

Использование ГБЖ в металлошихте привело к изменению основных технологических показателей плавки, а именно к увеличению расхода электроэнергии (на 10,2%), кислорода (на 13,1%), расходного коэффициента шихты (на 6,2%), извести (на 8,5%), MgO-содержащего флюса (на 1,4%). При этом длительность цикла плавки осталась на одном уровне.

Для анализа влияния ГБЖ на показатели плавки при выплавке полупродукта в ДСП-150 ТАГМЕТ также использовали два массива плавов, произведенных в разные отчетные периоды:

1. Массив, состоящий из 360 плавов, выполненных с использованием 100% металлического лома;

2. Массив, состоящий из 345 плавов. Из них 165 плавов с использованием ГБЖ и 180 плавов при использовании 100% лома (средняя доля ГБЖ – 11,2 %, максимальная – 36% (51 тонна)).

Использование ГБЖ в металлошихте привело к изменению основных технологических показателей плавки, а именно к увеличению расхода электроэнергии (на 20,2%), кислорода (на 2,5%), расходного коэффициента шихты (на 8,6%), извести (на 34,8%), MgO-содержащего флюса (на 40%). При этом отмечено снижение длительности цикла плавки (на 3,9%).

Оценка изменения выхода годного в зависимости от доли ГБЖ показывает, что при увеличении доли ГБЖ в шихте до 25% происходит снижение выхода годного с 91% до 86% (рис. 10).

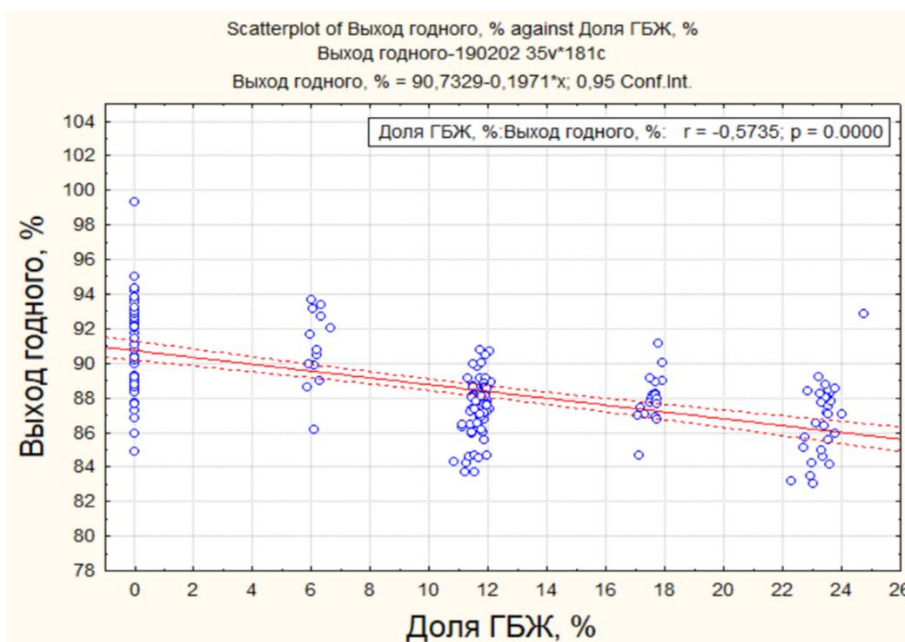


Рис. 10. Изменение выхода годного при увеличении доли ГБЖ.

Наличие значительного количества SiO_2 (4,3%) в ГБЖ потребовало увеличения расхода извести для соблюдения рекомендуемой основности шлака, что приводило к повышенному количеству образующегося шлака (рис. 11) и увеличению энергетических затрат. Наличие оксидов железа в ГБЖ (около 10%) также требует дополнительного количества энергии для их восстановления.

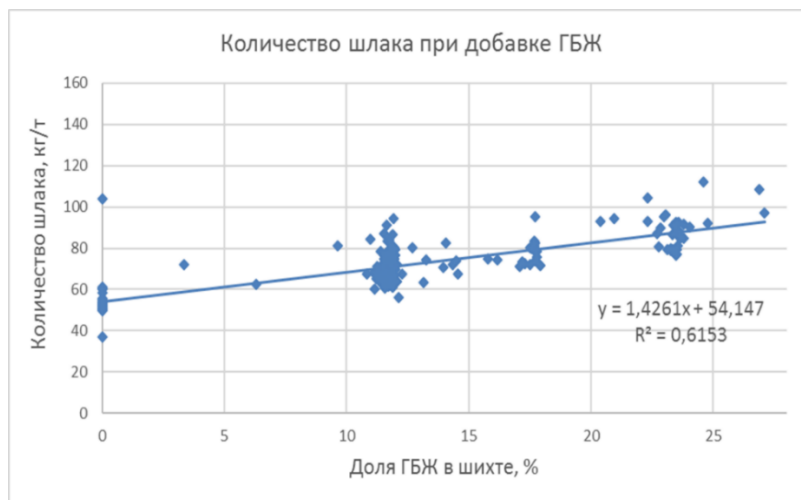


Рис. 11. Количество шлака при увеличении доли ГБЖ в шихте.

При увеличении доли ГБЖ с 0 до 25% количество шлака в ДСП-150 ВТЗ увеличивается с 53 до 90 кг/т (на 70%), что приводит к повышению среднего удельного расхода электроэнергии с 400 до 455 кВт·ч/т (на 13,8%).

Далее выполнен анализ влияния количества шлака на удельный расход электроэнергии при выплавке полупродукта с использованием различной доли ГБЖ в шихте. При увеличении количества шлака с 75 до 155 кг/т средний удельный расход электроэнергии повышается с 400 до 450 кВт·ч/т (на 12,5%).

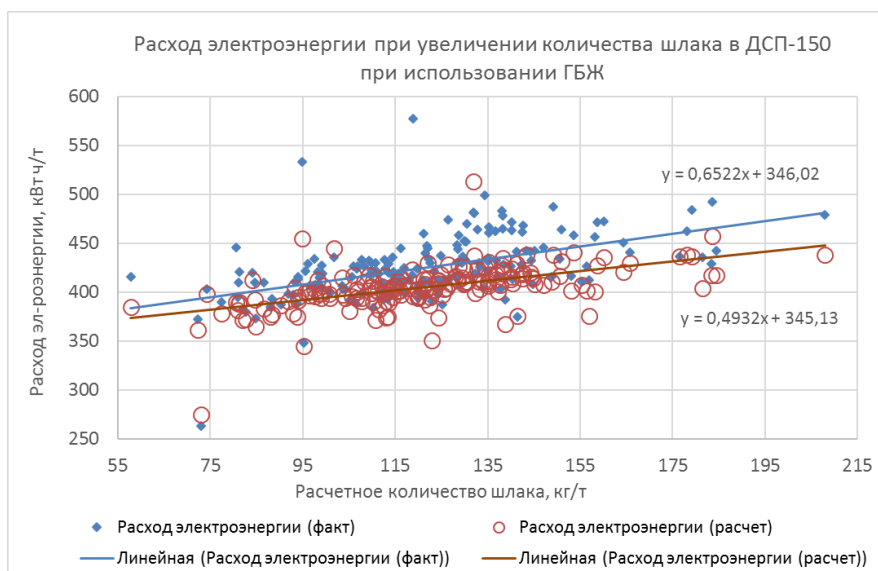


Рис. 12. Удельный расход электроэнергии в зависимости от количества шлака в ДСП-150 при использовании ГБЖ в шихте.

На рис. 12 также представлен расчетный расход электроэнергии. Расчет электрической энергии проводили следующим образом. Количество электрической энергии на производство 1 т жидкого полупродукта складывается из энергии,

необходимой для расплавления металлошихты и флюсовых добавок (металлического лома, ГБЖ, извести, MgO-флюса) и перегрева их до температуры 1570 °С, а также энергии, необходимой для перегрева образовавшегося расплавленного металла и шлака от температуры 1570 °С до температуры выпуска:

$$W_{\text{расч}} = \frac{\left\{ \begin{aligned} &M_{\text{лом}} * \Delta H_{\text{лом}}(0-1570) + M_{\text{ГБЖ}} * \Delta H_{\text{ГБЖ}}(0-1570) + \\ &+ M_{\text{изв}} * C_{\text{изв}} * \Delta T_{\text{изв}}(0-1570) + M_{\text{флюс}} * C_{\text{флюс}} * \Delta T_{\text{флюс}}(0-1570) + \\ &+ M_{\text{Ме}} * C_{\text{Ме}} * \Delta T_{\text{Ме}}(1570-T_{\text{К}}) + M_{\text{шл}} * (C_{\text{шл}} * \Delta T_{(1570-T_{\text{К}})} + q_{\text{шл}}) \end{aligned} \right\}}{M_{\text{Ме}} * X_{\text{эл}}} \quad (8)$$

При расчете учитывали энергетические потребности процесса плавения лома $\Delta H_{\text{лом}}(0-1570) = 388$ кВт·ч/т и ГБЖ $\Delta H_{\text{ГБЖ}}(0-1570) = 490$ кВт·ч/т до температуры 1570 °С, теплоемкости жидкого металла $C_{\text{Ме}} = 0,2325$ кВт·ч/(т·К) и шлака $C_{\text{шл}} = 0,3472$ кВт·ч/(т·К), теплоемкости извести и MgO-флюса $C_{\text{изв}} = C_{\text{флюс}} = 0,233$ кВт·ч/(т·К), а также скрытую теплоту плавления шлака $q_{\text{шл}} = 58,1949$ кВт·ч/т.

На рис. 13 показан удельный расход электроэнергии в зависимости от количества добавляемой извести.

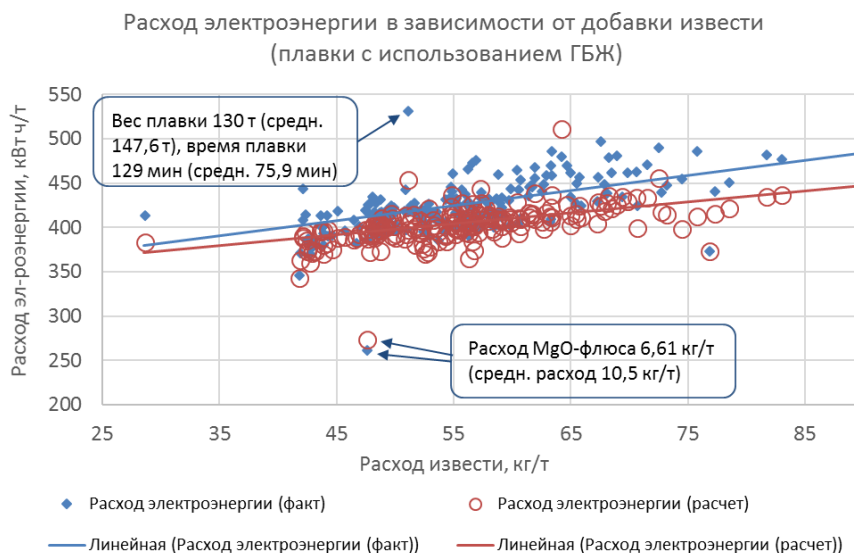


Рис. 13. Удельный расход электроэнергии в зависимости от расхода извести в ДСП-150 при использовании ГБЖ в шихте.

При увеличении расхода извести с 45 до 75 кг/т удельный расход электроэнергии возрастает с 405 до 455 кВт·ч/т (на 12,3 %), что существенно отражается на экономических затратах. Из приведенных данных видно, что расход электроэнергии имеет четкую зависимость от количества шлака, изменение которого вызвано наличием значительным количеством SiO_2 в ГБЖ и добавляемой известью для поддержания заданной основности. Поэтому добавка извести для проведения процесса дефосфорации должна быть обоснована. Разброс показателей обусловлен различными не стандартными ситуациями, связанными, например, с задержками выпуска плавки, малым количеством выпускаемого металла и прочее. Анализ некоторых таких показателей представлен на рис.13.

Таким образом, сокращение количества шлака за счет снижения добавки извести и понижения его основности позволит снизить расход электроэнергии и получить при этом требуемое содержание фосфора в полупродукте благодаря его низкому содержанию в ГБЖ. При этом добавка извести должна осуществляться таким образом, чтобы обеспечить характеристики шлака, способного пениться.

Несмотря на увеличение расходных коэффициентов, характеризующих эффективность процесса и некоторое снижение стойкости футеровки, использование ГБЖ остается одним из способов, позволяющих получить чистый металл по ряду примесей включая цветные.

В **четвертой главе** представлен анализ износа футеровки и изменения состава шлака при разной доле ГБЖ в шихте, предложены рекомендации по ведению шлакового режима.

В процессе эксплуатации ДСП визуально оценивали состояние рабочего слоя футеровки после выпуска плавки из печи. После вывода ДСП из эксплуатации для проведения промежуточного ремонта футеровки производили ее демонтаж и снятие топографии износа рабочего слоя. При последовательном удалении рядов футеровки осуществляли замер остаточной толщины ПУ кирпича. Измерения производили в определенных точках по периметру печи. На примере одной из кампаний печи, состоящей из 508 плавов, показана топография износа футеровки. Значительно выраженный износ рабочего слоя отмечен в районе шлакового пояса по всему периметру печи. Наибольший износ футеровки зафиксирован в зоне эркера, а также в местах расположения газокислородных модулей (воздействие факела на футеровку), что приводило к повышенному локальному износу ПУ изделий.

При оценке состояния рабочего слоя футеровки в процессе эксплуатации ДСП-150 ТАГМЕТ и ВТЗ отмечено, что использование добавки ГБЖ в металлошихте отрицательно отражается на стойкости футеровки печи. Это обусловлено изменением количества и состава шлака, а также энергетических показателей плавки. Наличие оксидов железа в ГБЖ оказывает значительное влияние на окисленность металла и шлака и требует дополнительных энергетических затрат для восстановления железа. В связи с этим появляется необходимость повышения расхода электрической энергии. Наличие пустой породы в ГБЖ приводит к повышенному количеству образующегося шлака в печи, что также отражается на расходе электроэнергии и влияет на стойкость магнезиальной футеровки ДСП. Важно отметить высокое содержание диоксида кремния в ГБЖ (4,3 %), который понижает основность шлака и увеличивает износ футеровки. Например, при добавке 20 т ГБЖ в металлошихту содержание SiO_2 в шлаке увеличивается на $4,3\% \cdot 20\text{т} / 100\% = 0,86\text{т}$ (860 кг). При этом для поддержания основности шлака на уровне 2 требуется ввести дополнительно около 2 тонн извести, что увеличивает количество шлака и приводит к повышению расхода электроэнергии необходимой для его теплосодержания, что также отрицательно влияет на футеровку.

На гистограммах на рис. 14 показаны стойкости ПУ футеровки ДСП-150 ТАГМЕТ на разных кампаниях в 2014-2015 гг. при выплавке стали с использованием 100% лома и использовании ГБЖ в завалке. Отмечено значительное снижение стойкости футеровки ДСП в период использования ГБЖ. Максимальная доля ГБЖ в металлошихте в данный период составила 36 % (51 т).

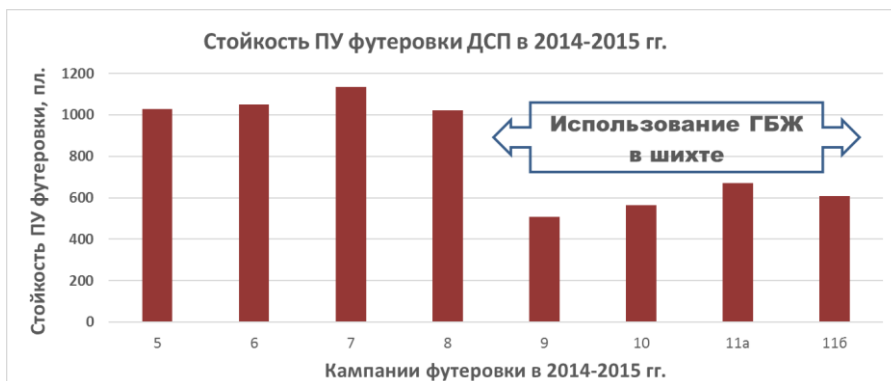


Рис. 14. Стойкость футеровки ДСП-150 при использовании металлического лома и ГБЖ в шихте.

В условиях ЭСПЦ ВТЗ при выплавке стали в ДСП-150 провели анализ изменения стойкости кирпичной ПУ футеровки на различных кампаниях в зависимости от средней доли ГБЖ в шихте. Данные представлены в диаграмме на рис. 15.

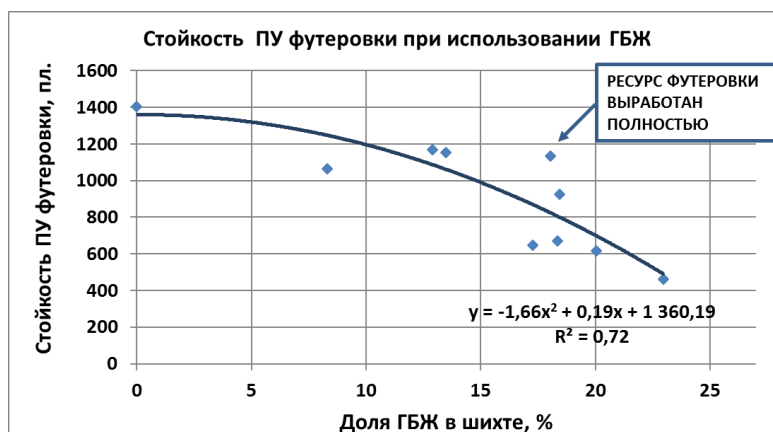


Рис. 15. Стойкость футеровки ДСП-150 при увеличении доли ГБЖ в шихте.

Согласно представленному графику, при увеличении доли ГБЖ в шихте с 10 до 20% снижение стойкости рабочего слоя футеровки может составлять около 500 плавов. Это может быть связано с повышенной тепловой нагрузкой, вызванной увеличением количества вводимой электрической и химической энергии при повышении доли ГБЖ, а также с воздействием шлака, характеристики которого в процессе эксплуатации не всегда обеспечивали необходимый уровень его вспенивания.

Образование в жидкой ванне конгломератов, имеющих более низкую плотность по сравнению с расплавом, может приводить к тому, что в процессе плавки они находятся над поверхностью ванны и могут привариваться к стенам футеровки печи и водоохлаждаемым панелям, образуя крупные тугоплавкие настывы. Традиционно вводимое количество энергетических затрат для расплавления образовавшихся в локальных зонах ванны ДСП настывов может быть недостаточно и они присутствуют в

печи в течение всей кампании футеровки печи, создавая угрозу их обрушения в ванну печи при выпуске плавки, повреждая при этом рабочую футеровку печи и приводя к поломке электродов при обрушении.

При анализе массива плавов (107 плавов), проведенных на ДСП-150 ТАГМЕТ отмечено, что содержание FeO в шлаке возрастает с 26% до 32% при увеличении доли ГБЖ до 30%. Основность шлака при этом уменьшилась в среднем с 2,2 до 1,8, что привело к снижению его способности пениться и отрицательно повлияло на расход энергетических показателей плавки и износ футеровки.

Помимо значительного снижения стойкости футеровки ДСП (на 16,6-50,2%) в условиях использования ГБЖ на ДСП-150 ТАГМЕТ также отмечено повышение удельного расхода огнеупорных (на 4,6-30%) и шлакообразующих материалов (на 1,4-40%). Это связано с повышением тепловой и химической нагрузки на футеровку печи, обусловленное влиянием добавки ГБЖ. Повышенный износ рабочего слоя футеровки связан с более агрессивным влиянием шлака, основность которого снижается при увеличении доли ГБЖ. Необходимость повышения основности шлака и насыщения его MgO влечет за собой повышение расхода извести и MgO-содержащего флюса, что также отмечено при анализе данных плавов. Увеличение количества шлака приводит к повышению расхода энергетических затрат для его теплосодержания.

Для оценки скорости износа футеровки во время эксплуатации ДСП-150 ВТЗ при использовании ГБЖ массив с плавками был разбит на интервалы с разным содержанием ГБЖ в завалке, таким образом, чтобы в каждом интервале находилось примерно одинаковое количество плавов. По каждому интервалу рассчитали средний процент ГБЖ в шихте, среднее содержание оксида магния в шлаке, удельный вес шлака, а также количество оксида магния, поступающее в шлак из MgO-содержащего флюса и футеровки печи. Результаты расчета представлены в гистограммах на рис. 16.

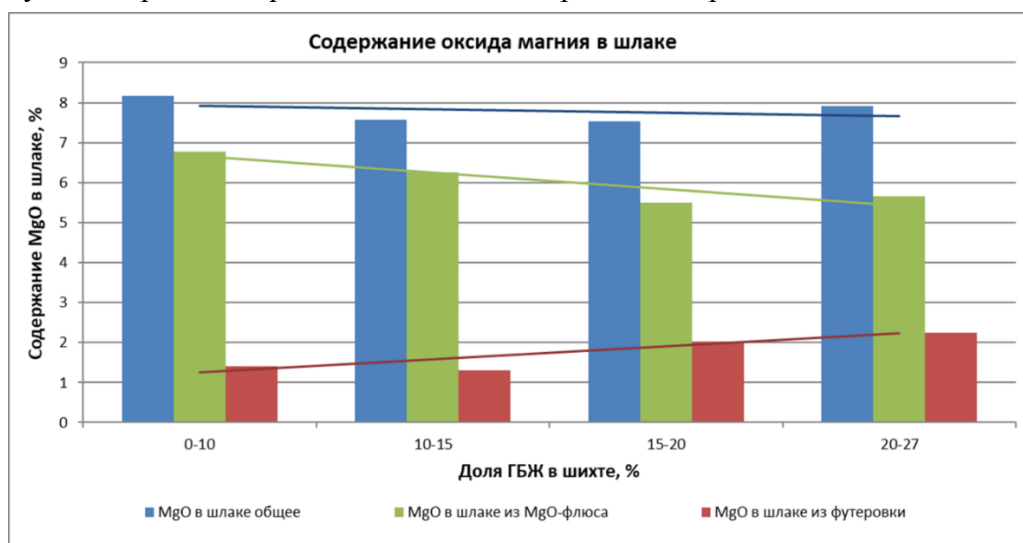


Рис. 16. Содержание MgO в шлаке при разной доле ГБЖ в завалке (анализ 194 плавки).

Расчет содержания оксида магния (%) в шлаке, переходящего из рабочего слоя футеровки производили по формуле:

$$(MgO)_{фут} = (MgO)_{шл} - (MgO)_{флюс} \quad (9)$$

где $(MgO)_{шл}$ – общее содержание оксида магния в шлаке, %;

$(MgO)_{флюс}$ – количество оксида магния, переходящее в шлак из магнезиального флюса, %.

Расчет $(MgO)_{флюс}$ (%) производили по формуле:

$$(MgO)_{флюс} = Q_{флюс} * 0,695 / Q_{шл} * 100 \quad (10)$$

где $Q_{флюс}$ – количество отданного магнезиального флюса на плавку, кг;

0,695 – доля оксида магния в магнезиальном флюсе;

$Q_{шл}$ – количество образующегося шлака, кг.

Из представленных на рисунках данных видно, что расчетное количество MgO , переходящее из футеровки в шлак, при увеличении добавки ГБЖ до 27% возрастает с 1,2% до 2,2%, что связано в первую очередь с его переходом из магнезиальной футеровки в шлак. При этом общее содержание оксида магния находилось примерно на одном уровне 7,5 – 8 % и стремилось к пределу насыщения в шлаке. Поэтому при отдаче MgO -содержащего флюса рекомендуется поддерживать его содержание на уровне 8%, чтобы уменьшить износ рабочего слоя футеровки. Значительное снижение содержания MgO в шлаке ниже этого уровня может привести к интенсивному переходу MgO из футеровки в шлак.

На примере ДСП-150 показано, что при увеличении доли ГБЖ увеличивается содержание MgO в шлаке, поступающего из периклазоуглеродистой футеровки, что свидетельствует о повышенном ее износе. Установленная зависимость, показывающая приращение MgO в шлаке при увеличении доли ГБЖ, позволяет прогнозировать стойкость футеровки в зависимости от доли ГБЖ в шихте и планировать проведение ремонта футеровки ДСП.

Пятая глава посвящена оценке экономической целесообразности использования ГБЖ при замене им передельного чугуна и дорогостоящего вида лома при производстве полупродукта в ДСП-150 с учетом изменения технологических показателей плавки. Предложена методика оценки затрат на производство полупродукта с учетом замены традиционно используемой шихты (металлический лом и передельный чугун) на ГБЖ в различном объеме включая оценку изменения затрат на энергоресурсы и вспомогательные материалы.

В процессе данной работы экспериментально установлено, что расход огнеупорных материалов для обслуживания футеровки ДСП (магнезиальные подварочные и торкрет-массы) при повышении доли ГБЖ необходимо увеличивать и поддерживать их расход согласно формуле:

$$Q_{масс} = A * (1 + X / 100) \quad (11)$$

где A – расход массы на тонну стали при работе на 100 % ломе, кг/т;

X – доля ГБЖ в шихте, %.

Учитывая чистоту ГБЖ по содержанию фосфора, процесс дефосфорации можно вести на пониженной основности – на уровне нижнего предела рекомендованного состава шлака (около 2). Уменьшение основности может привести к ухудшению его способности

пениться, что отрицательно отразится на стойкости футеровки. Увеличение основности влечет за собой увеличение количества шлака и отражается на расходе электроэнергии, что в свою очередь также отрицательно влияет на износ футеровки печи. В связи с этим, расход извести на тонну стали рекомендуется осуществлять согласно формуле, учитывающей долю ГБЖ в шихте (X), количество SiO_2 в нем (Y), и содержание CaO в извести (C) при поддержании основности (B) шлака на уровне 2, что позволит оптимизировать отдачу извести и расход других ресурсов на производство стали:

$$Q_{\text{изв}} = A * (1-X) + B * Y/C * X \quad (12)$$

где A – расход извести на тонну стали при работе на 100% ломе, кг.

Для оценки экономической целесообразности использования ГБЖ при замене им дорогостоящего вида сырья были построены зависимости, показывающие затраты на производство 1 т полупродукта при использовании серийно-применяемого сырья (без использования ГБЖ) и затраты при использовании различной доли ГБЖ с учетом изменения технологических показателей плавки, которые меняются при изменении доли ГБЖ в шихте (рис. 17).

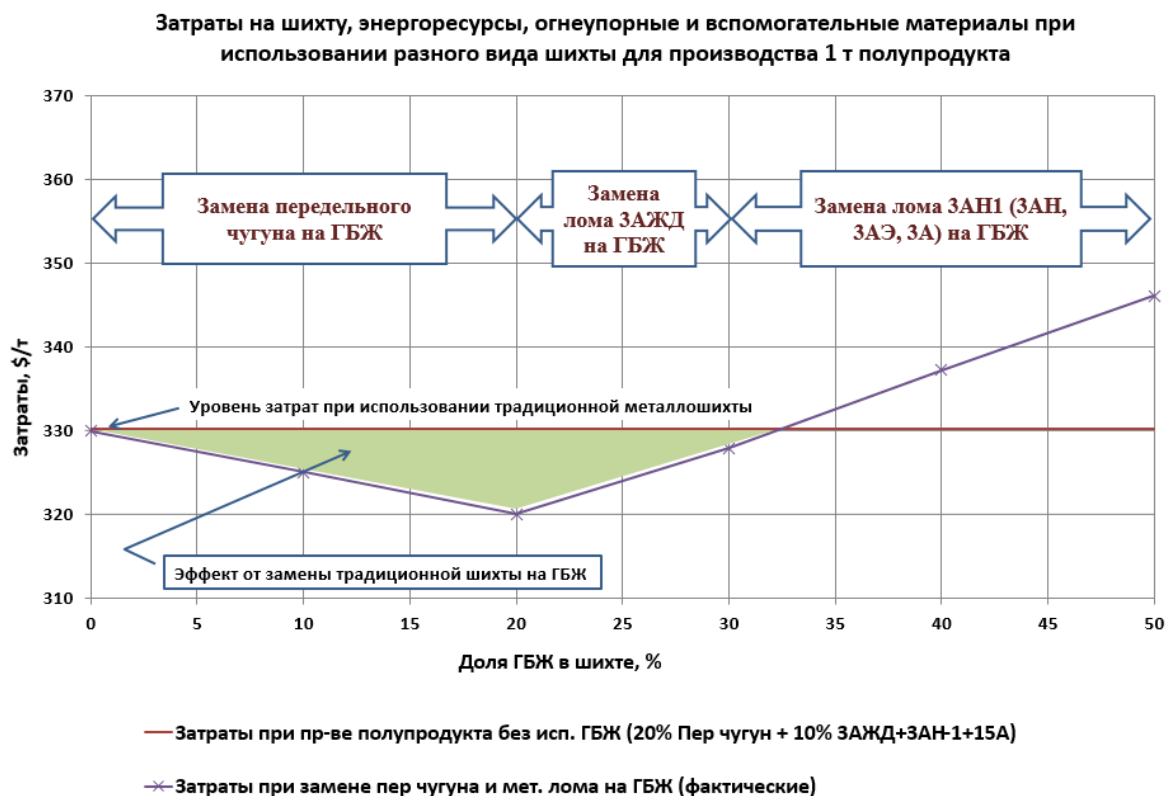


Рис. 17. Затраты на сырье, энергоресурсы, огнеупоры и вспомогательные материалы для производства 1 т полупродукта в ДСП-150.

В расчет затрат включены затраты на шихту, энергоресурсы (электроэнергию, электроды, кислород, УСМ), шлакообразующие добавки, огнеупоры, а также учтены потери от снижения выхода годного при увеличении доли ГБЖ. Затраты на данные материалы рассчитывали с учетом стоимости этих материалов на анализируемый период эксплуатации печи в долларах США.

Экономический эффект при использовании ГБЖ достигается за счет замены им дорогостоящего вида сырья. При замене в металлошихте дорогостоящего перedельного чугуна на ГБЖ затраты на производство полупродукта снижаются. В данном случае затраты начинают расти при дальнейшей замене менее дорогого лома типа 3АЖД на ГБЖ. При анализе данной технологической схемы производства максимальный экономический эффект от добавки ГБЖ находится при доле ГБЖ, составляющей 20 %. Учитывая влияние ГБЖ на технологические показатели плавки – расход электроэнергии, электродов, огнеупорных и шлакообразующих материалов, выход годного, затраты на производство полупродукта возрастают, и при увеличении доли ГБЖ более 33% превышают затраты на производство полупродукта при использовании традиционно применяемой металлошихты. Следует отметить, что в расчет затрат при использовании ГБЖ не включены трудозатраты, количество которых увеличится со снижением стойкости футеровки, не учтены простои печи и цеха, связанные с ремонтом футеровки.

Важно отметить, что затраты на энергоресурсы и вспомогательные материалы составляют около 13% от общих затрат на производство полупродукта и основной экономический эффект достигается за счет снижения стоимости металлошихты. Изменение затрат на производство при замене 20% перedельного чугуна на ГБЖ составляют около 12,6% (без учета потерь от выхода годного), на шихту – около 7,7%.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Проведено исследование выплавки полупродукта в ДСП-150, имеющей порционную загрузку твердой завалки с применением горячебрикетированного железа в условиях металлургических заводов компании ТМК. Изучен механизм плавления металлошихты, содержащей более 20 % ГБЖ.

Показано, что при порционной загрузке наиболее рациональная доля ГБЖ определенного состава на уровне 25%. Увеличение доли ГБЖ в металлошихте более 25-30% при завалке корзиной вместе с ломом приводит к образованию в жидкой ванне крупных конгломератов, представляющих собой нерасплавившиеся глыбы, состоящие из компонентов завалки - ГБЖ, лома, кокса, извести и имеющие оплавленную корочку на поверхности. Конгломераты привариваются к стенам и подине печи и образуют на них огромные тугоплавкие настывы с низкой теплопроводностью и повышенной пористостью по сравнению с металлическим ломом, что усложняет процесс ведения плавки.

2. Рассмотрены различные способы распределения ГБЖ в завалочной бадье совместно с ломом при загрузке шихты в ДСП. Показано, что оптимальным вариантом загрузки ГБЖ является его послойная отдача совместно с металлическим ломом. Такой способ подачи ГБЖ позволяет избежать образования больших тугоплавких конгломератов в ванне ДСП, состоящих преимущественно из ГБЖ, избежать образования крупных настывов на стенах футеровки и водоохлаждаемых панелях печи, а также предотвратить локальные перегревы рабочего слоя футеровки. В то же время взаимное расположение ГБЖ и лома в печи может позволить искусственное создание гарнисажного слоя и

защитить футеровку печи, повысить ее стойкость и снизить расход огнеупорных материалов для ее обслуживания.

3. В условиях ДСП-150 проведен анализ влияния добавки ГБЖ на степень дефосфорации, содержание углерода и окисленность системы металл-шлак. Показано, что с увеличением доли ГБЖ в металлошихте конечное содержание углерода снижается с 0,08% до 0,06% и менее, при изменении ГБЖ от 0 до 25%, содержание оксидов железа в шлаке возрастает с 24-27% до 30-33%. Окисленность стали при увеличении доли ГБЖ также возрастает. При этом подчиняясь термодинамическим закономерностям процесс дефосфорации с увеличением доли ГБЖ в металлошихте протекает более эффективно. Учитывая последнее, и то, что ГБЖ гораздо чище по содержанию фосфора, чем используемый металлический лом, целесообразно уменьшать расход извести, в основном ориентируясь на получение шлака относительно нейтрального по отношению к футеровке ДСП и способного пениться.

4. Анализ плавов показывает, что увеличение добавки ГБЖ приводит к ухудшению основных энерготехнологических показателей плавки, а также к повышению расхода шлакообразующих материалов в ДСП-150. Это обусловлено наличием оксидов железа в ГБЖ, для восстановления которых углеродом необходимы тепловые затраты. Наличие пустой породы в брикетах увеличивает количество шлака в печи и снижает коэффициент теплопроводности шихты, что также отражается на расходе электроэнергии. Так, в условиях ВТЗ при увеличении доли ГБЖ в шихте с 0 до 27%, средний удельный расход электроэнергии повышается с 400 до 465 кВт·ч/т (на 16,3%), расходный коэффициент шихты возрастает с 1,13 до 1,18 (на 4,4%), количество шлака - с 54 до 92 кг/т (на 70%).

5. Предложена методика оценки распределения примесей цветных металлов в полупродукте в зависимости от доли ГБЖ в шихте с использованием функции нормального распределения примесей в исходных сырьевых материалах. Использование данной методики позволит прогнозировать риски, связанные с отклонением химического состава стали по примесям цветных металлов при производстве полупродукта.

6. На примере ДСП-150 показано, что при увеличении доли ГБЖ увеличивается содержание MgO в шлаке, поступающего из периклазоуглеродистой футеровки, что свидетельствует о повышенном ее износе. Установленная зависимость, показывающая приращение MgO в шлаке при увеличении доли ГБЖ, позволяет прогнозировать стойкость футеровки в зависимости от доли ГБЖ в шихте и планировать проведение ремонта футеровки ДСП. Предложены рекомендации по отдаче огнеупорных материалов (магнезиальная подварочная масса, торкрет-масса) для обслуживания футеровки печи с целью поддержания надлежащей стойкости футеровки печи в условиях использования ГБЖ. Даны рекомендации по отдаче извести для оптимального ведения шлакового режима. Данные рекомендации были учтены и опробованы при выплавке полупродукта в ДСП-150 в условиях ПАО «ТАГМЕТ» и АО «ВТЗ».

7. Предложена методика оценки затрат на производство полупродукта с учетом замены традиционно используемой шихты (металлический лом и передельный чугун) на

ГБЖ в различном объеме включая оценку изменения затрат на энергоресурсы и вспомогательные материалы. Экономический эффект при использовании ГБЖ достигается за счет замены им дорогостоящего вида сырья. Учитывая влияние ГБЖ на технологические показатели плавки – расход электроэнергии, электродов, огнеупорных и шлакообразующих материалов, выход годного, затраты на производство полупродукта возрастают, и при увеличении доли ГБЖ более 33% превышают затраты на производство полупродукта при использовании традиционно применяемой металлошихты.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Коростелев А.А., Котельников Г.И., Семин А.Е., Божесков А.Н., Неклюдов И.В., Казаков В.В. Анализ влияния добавки горячбрикетированного железа в завалке на технологические показатели плавки в электропечи // Черные металлы - 2017. - № 10. С. 33 – 40.

2. Коростелев А.А., Семин А.Е., Котельников Г.И., Емельянов В.В., Мурзин И.С. Использование горячбрикетированного железа при выплавке стали в дуговой сталеплавильной печи // Черные металлы - 2018. - № 3. С. 18 – 23.

3. Коростелев А.А., Семин А.Е., Котельников Г.И., Мурзин И.С., Емельянов В.В., Рожков В.В., Неклюдов И.В., Божесков А.Н., Казаков В.В. Стойкость футеровки ДСП в условиях использования горячбрикетированного железа в шихте. // Черная металлургия. - 2017. - № 11. С. 77 – 86.

4. Коростелев А.А., Съемщиков Н.С., Семин А.Е., Котельников Г.И., Мурзин И.С., Емельянов В.В., Колоколов Е.А., Белоношко С.С. Повышение стойкости футеровки ДСП при использовании ГБЖ в завалке. // Новые огнеупоры. - 2018. - № 3. С. 3 – 10.

5. Коростелев А.А., Съемщиков Н.С., Семин А.Е., Котельников Г.И. Повышение стойкости футеровки ДСП при использовании ГБЖ в завалке (Тезисы доклада). // Новые огнеупоры. - 2018. - № 4. С. 67 – 68.

6. Korostelev A. A., S'emshchikov N. S., Semin A.E., Kotel'nikov G. I., Murzin I. S., Emel'yanov V. V., Kolokolov E. A., Belonozhko S. S. Increase in EAF Lining Life with Use of Hot-Briquetted Iron in a Charge // Refractories and Industrial Ceramics. - July 2018, Volume 59, Issue 2, pp 107-114. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11148-018-0191-7>

В других изданиях:

1. Коростелев А.А., Семин А.Е., Котельников Г.И. Анализ влияния добавки ГБЖ в металлошихту на технологические показатели производства стали в ДСП (Тезисы доклада). // Сборник трудов конференции “Физико-химические основы металлургических процессов” – 2017. С.46.

2. Коростелев А.А., Съемщиков Н.С., Семин А.Е., Котельников Г.И., Косырев К.Л., Неклюдов И.В., Мурзин И.С. Повышение эффективности производства электростали при использовании ГБЖ в завалке // Сборник трудов XV конгресса сталеплавильщиков. – Тула, 2018. С.224-234.