

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

На правах рукописи



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»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Семин А.Е.

Москва – 2019 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
 1. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ В ДСП И РОЛЬ МЕТАЛЛИЗОВАННОГО СЫРЬЯ (АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)	11
1.1. Технологические приемы повышения эффективности производства стали в ДСП	11
1.2. Роль горячебрикетированного железа в производстве стали.....	15
1.2.1. Выплавка стали с использованием металлизированного сырья.....	15
1.2.2. Использование ГБЖ при выплавке стали в ДСП	24
1.2.3. Основные преимущества использования ГБЖ.....	25
1.2.4. Проблемы при использовании ГБЖ.....	27
1.3. Стойкость футеровки ДСП и влияние на нее металлизированного сырья.....	31
1.4. Выводы по главе 1	37
1.5. Постановка задачи исследования	38
 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ	40
2.1. Характеристики ДСП-150	40
2.2. Требования к производимому полупродукту.....	43
2.3. Характеристика применяемого сырья и вспомогательных материалов	43
2.4. Характеристика применяемой футеровки и огнеупорных материалов для ее обслуживания	45
2.5. Исследуемые технологические схемы выплавки стали с использованием ГБЖ	48
 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВКИ ГБЖ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПЛАВКИ В ДСП-150	53
3.1. Влияние добавки ГБЖ на технологические показатели плавки	53
3.1.1. Исследование влияния различных параметров плавки на технологические показатели при использовании ГБЖ	68
3.1.2. Влияние добавки ГБЖ на содержание углерода в полупродукте и окисленность системы металл-шлак	75
3.2. Образование тугоплавких шлакометаллических конгломератов (айсбергов)	

при использовании ГБЖ	78
3.3. Способы порционной загрузки металлошихты, содержащей ГБЖ	84
3.4. Влияние добавки ГБЖ на содержание примесей в стали	86
3.4.1. Анализ влияния ГБЖ на содержание фосфора, серы и азота. Анализ распределения фосфора между шлаком и металлом.	86
3.4.2. Анализ влияния ГБЖ на содержание примесей цветных металлов	102
3.4.3. Прогноз содержания меди в полупродукте при разной доле ГБЖ в шихте. Построение регрессионного уравнения	108
3.5. Оценка экономической целесообразности замены металлического лома на ГБЖ	113
3.6. Выводы по главе 3	115
 4. АНАЛИЗ ИЗНОСА ФУТЕРОВКИ ДСП ПРИ ПОВЫШЕНИИ ДОЛИ ГБЖ В ШИХТЕ	119
4.1. Оценка стойкости футеровки и расхода огнеупорных масс для ее обслуживания при использовании ГБЖ.....	119
4.2. Анализ состава шлака и его влияния на магниальную футеровку при повышении доли ГБЖ	122
4.3. Балансовый анализ процесса перехода MgO из футеровки в шлак	134
4.4. Выводы по главе 4	139
 5. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГБЖ В ШИХТЕ	140
5.1. Совершенствование технологического режима и разработка рекомендаций по обслуживанию футеровки ДСП-150 в условиях использования ГБЖ	140
5.1.1. Рекомендации по достижению требуемого содержания углерода в полупродукте и окисленности.....	141
5.1.2. Рекомендации по отдаче извести	142
5.1.3. Рекомендации по отдаче MgO-содержащего флюса	143
5.1.4. Подварка (заправка) подины ДСП и торкретирование футеровки	144
5.1.5. Загрузка ГБЖ в ДСП-150	145
5.1.6. Дополнительные рекомендации при работе с ГБЖ.....	146
5.2. Оценка экономической эффективности предложенных рекомендаций.....	146
5.3. Выводы по главе 5	149

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	151
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	158
Приложение А – Схема точек измерений остаточной толщины футеровки ДСП. Топография износа рабочего слоя футеровки.....	176
Приложение Б - Расчет затрат на производство полупродукта в ДСП-150 при использовании традиционно применяемой металлошихты и ГБЖ	178
Приложение В - Акты передачи материалов и опробования технических решений при выплавке полупродукта в ДСП с использованием ГБЖ.....	183

ВВЕДЕНИЕ

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 металлized 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 металлized сырьем 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 докладывались и обсуждались 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.).

Автором выносятся на защиту.

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 плавки 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 плавки 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>).

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 горячебрикетированного 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 горячебрикетированного 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 горячебрикетированного 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-](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.

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.

1. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ В ДСП И РОЛЬ МЕТАЛЛИЗОВАННОГО СЫРЬЯ (АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

1.1. Технологические приемы повышения эффективности производства стали в ДСП

Важную роль при производстве электростали играют технико-экономические показатели плавки – расход шихты, энергоресурсов и вспомогательных материалов. В условиях конкуренции металлургии ищут новые возможности снижения удельных затрат на тонну стали, при этом уделяя особое внимание качеству производимого металла.

При обзоре способов повышения эффективности производства электростали можно выделить ряд решений, повлиявших на увеличение производительности дуговой сталеплавильной печи (ДСП) и снижение удельных экономических затрат. К таким решениям можно отнести повышение электрической мощности ДСП, интенсивное использование кислорода в комбинации с углеродсодержащими порошками с применением новых конструкций фурм, повышение вместимости ДСП, применение подогрева лома [108], использование донной продувки в печи [178], использование АСУ ТП и другие [18, 19, 20, 41, 96, 151, 158, 167]. При этом большое внимание уделяется качеству производимой стали.

Важно отметить такое технологическое решение, как использование пенистых шлаков при плавке 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 благодаря своей низкой теплопроводности также экранирует излучение электрической дуги и не только способствует более полному усвоению электрической энергии металлом, но и предохраняет огнеупорную футеровку печи. При моделировании процессов излучения электрических дуг в пространстве 210-т ДСП в работе [189] установлена некоторая зависимость интенсивности излучения от высоты слоя шлака. Формирование пенистых магнезиальных шлаков, обладающих низким агрессивным воздействием на футеровку ДСП и высокими рафинирующими свойствами, показано в работах [9, 12, 14, 56, 57, 58, 59, 101, 147]. Процесс вспенивания сталеплавильного шлака достаточно сложен из-за совместного влияния многочисленных физико-химических, физико-технических и других факторов. Закономерности, которыми характеризуется

процесс образования пены, существенно зависят от условий проведения технологического процесса. Можно отметить два основных фактора, которые влияют на процесс вспенивания шлака. Это количество образующегося в ванне ДСП газа, для вспенивания шлака и способность шлака удерживать вспенивающий газ в своем объеме. Основные используемые способы вспенивания электропечного шлака предусматривают вдувание угольного порошка и газообразного кислорода в жидкую ванну путем установки на печь дополнительного оборудования, включающего в себя пневматическую систему подачи пылевидного углерода в шлак через специальные инжекторы, а также фурмы для продувки.

Другим не менее эффективным способом вспенивания шлака является использование в процессе выплавки стали металлизированных окатышей. В процессе непрерывной загрузки металлизированных окатышей в ванну ДСП в результате протекания тепломассообменных процессов при нагреве и плавлении происходит окисление углерода металлизированных окатышей с образованием оксида и диоксида углерода, что приводит к вспениванию сталеплавильного шлака. Это связано в первую очередь с тем, что металлизированные окатыши обладают развитой пористой структурой, что способствует формированию мелких пузырей оксида углерода в объеме шлака и образованию устойчивой пены. То есть, при непрерывной загрузке металлизированных окатышей в ванну ДСП присутствуют основные факторы, обеспечивающие формирование вспененного шлака и стабилизирующие его:

- 1) достаточное количество углерода и кислорода;
- 2) расположение фронта обезуглероживания;
- 3) развитая пористая структура металлизированных окатышей.

Технология использования отходов полимеров в качестве материалов для вспенивания шлака в ДСП также позволила значительно снизить затраты на УСМ и продолжительность плавки [168].

В работе [88] показана важность контроля температуры полупродукта и поддержания состава печного шлака с целью совершенствования технологии и улучшения технико-экономических показателей работы сверхмощной ДСП. Разработан метод оперативного контроля качества вспенивания шлака в ДСП переменного тока по параметрам электрического режима. В работе [169] показан способ эффективного перемешивания металла в ДСП при помощи донной продувки. Результаты математического и физического моделирования опробованы на промышленной установке вместимостью 75 т и показано улучшение некоторых технико-экономических показателей сталеплавильного процесса.

Оснащение ДСП поворотным корпусом позволило Японским металлургам получить положительные результаты, связанные со снижением неравномерности плавления шихты и уменьшением удельного потребления электроэнергии за счет чередования положения горячих и холодных зон в печи [193]. В работе [87] предложена завалка одной бадьи в ДСП с телескопической конструкцией. Завалка одной бадьей, помимо явной экономии из-за того, что свод открывают только один раз за плавку, и потери энергии уменьшаются, позволяет более эффективно прогреть лом в кожухе за счет тепла, выделяемого от горелок, и вдувания кислорода, а также высокой степени сжигания окиси углерода благодаря увеличенному объему кожуха. Рациональная загрузка шихтовых материалов и расположение топливосжигающих устройств на примере ДСП-120 показано в работе [31], даны рекомендации по установке газокислородных горелок с целью обеспечения более равномерного и интенсивного теплообмена в слое холодных шихтовых материалов. Повышение эффективности использования энергии в ДСП за счет рационального режима ведения плавки и использования современных виртуальных фурм-горелок позволило снизить расход электроэнергии за счет высокого коэффициента использования кислорода, подаваемого через расходую трубу на границу металл-шлак [42]. Оптимизация работы газокислородных горелок в ДСП, а также исследование поведения газовой струи под уровнем расплава показано в работах [111, 112, 113, 188].

Отмечено положительное влияние электромагнитного перемешивания (ЭМП) металла в ДСП на длительность плавки и усреднение химического состава полупродукта [194]. Математическая модель процесса расплавления лома в ДСП с ЭМП позволяет прогнозировать продолжительность расплавления лома в печи при различных начальных условиях [165]. Численное моделирование процесса при ЭМП и естественной конвекции показало, что применение ЭМП позволяет в 4 раза увеличить скорость плавления одиночного куска стального лома, окруженного со всех сторон железоуглеродистым расплавом (за счет увеличения скорости движения металла и, соответственно, коэффициента конвективной теплоотдачи). Кроме того, расчетным путем установлено, что при ЭМП лимитирующей стадией при теплопереносе между куском лома и расплавом является теплопроводность в ломе, а при естественной конвекции – конвекция на межфазной границе. Разработка автоматизированного комплекса по приемке лома черных металлов и его сортировке показана в работе [148]. Для минимизации затрат электроэнергии и снижения себестоимости стали при условии соблюдения требований заказчика предложена структура автоматизированной системы технологической подготовки шихты для плавки в дуговой сталеплавильной печи [72]. Проведены модельные эксперименты, показывающие влияние фракционности металлического лома

на вероятность возникновения очагов “кострения” в ДСП при загрузке шихты в печь при помощи совка и бады [94].

Эффективная технология науглероживания полупродукта и комплексный подход к науглероживанию и раскислению полупродукта современной сверхмощной ДСП, реализованный в технологии использования SiC, позволил свести к минимуму присадки высококачественных, но дорогостоящих углеродсодержащих материалов, снизить расход алюминия и кремнистых ферросплавов, стабилизировать качество непрерывнолитых заготовок [47, 84]. Обоснование и расчет оптимального содержания углерода в шихте ДСП показано в работе [17]. Применяя полученную методику расчета углерода при шихтовке плавки, можно с определенной точностью получать требуемое содержание углерода в полупродукте на выпуске из ДСП. Это позволит экономить более дорогие УСМ, применяемые при внепечной обработке.

Применение технологии Consteel или ее модификаций с использованием непрерывной загрузки металлошихты в ДСП позволяет достигать высокие производственные показатели на зарубежных металлургических предприятиях и активно предлагается к использованию в России [71, 183]. Указанная технология позволяет достигать высокую производительность, использовать различные виды металлошихты (металлолом, железо прямого восстановления или ГБЖ, чушковый и жидкий чугун и др.) и ее подогрев. Помимо развития металлургических технологий также важна роль государства в развитии металлургического комплекса, состояние экономической ситуации, отражается и влияние кризисов. Для эффективного развития металлургии важно создавать условия, направленные на стимулирование инвестиционной деятельности компаний с учетом ключевых направлений развития металлургии [27, 152, 160, 161, 162].

В настоящий момент прогнозная оценка содержания меди и олова в амортизационном ломе в Японии подходит к критическим значениям. Для прогнозирования содержания меди, цинка и других примесей в полупродукте проводят подготовку лома к плавке осуществляя комплексную переработку путем шредирования и последующую сепарацию с целью извлечения вредных примесей. Проблема производства стали, чистой по примесям цветных металлов, остается острой и требует незамедлительного решения [85, 86]. Ускоренная амортизация автомобильного и бытового лома (10-12 лет) таит в себе опасность быстрого загрязнения лома с повышенным содержанием примесей цветных металлов вне предельно допустимых норм и сделает такой лом непригодным к последующему циклу плавки, превратив его в экологические отходы.

Еще одним решением при производстве качественной электростали является использование в шихте металлизированного сырья. Использование такого сырья имеет следующие основные преимущества: точно известный однородный химический состав со стабильными свойствами и отсутствие вредных примесей цветных металлов [52], что позволяет получать более качественный полупродукт.

1.2. Роль горячебрикетированного железа в производстве стали

1.2.1. Выплавка стали с использованием металлизированного сырья

Растущая конкуренция при производстве стали вынуждает металлургов искать новые возможности повышения качества металла и снижения затрат на тонну производимой стали, в том числе использовать при выплавке электростали в качестве шихты металлизированное сырье. Важную роль при этом играют технико-экономические показатели плавки – расход электроэнергии, кислорода, природного газа, углеродсодержащих материалов, извести, флюсовых добавок и другие. Учитывая наличие значительного количества оксидов железа и пустой породы, содержащихся в таком сырье, необходимо учитывать его влияние на технологические показатели плавки и стойкость футеровки ДСП.

Влияние металлизированного сырья на качество и свойства стали может проявляться по-разному. Прежде всего, это - непосредственное влияние, обусловленное отсутствием в таком сырье примесей цветных металлов (Cu, Zn, Ni, Sn и др.) [52, 61, 62, 184]. Очевидно, что увеличение в шихте доли железа прямого восстановления позволит обеспечить пониженное содержание цветных примесей в полупродукте. Вместе с тем применение ГБЖ при соблюдении определенных условий в технологии обеспечивает получение в полупродукте весьма низких содержаний азота. При использовании технологии ковшевого легирования и рафинирования соответственно гораздо более низкие содержания азота будут получены и в готовой стали.

Немаловажным является однородность химического состава и физического размера (фракции) металлизированного сырья, что способствует стабильности процесса выплавки стали от плавки к плавке. Исследование влияния металлизированного сырья на технологические показатели электроплавки и качество получаемого полупродукта, а также перспективы его использования показаны в работах [34, 68, 77, 98, 110, 123, 126, 136, 140, 142, 146, 172, 173, 174, 181, 184]. В работе [81] изучены особенности нагрева и плавления железорудных металлизированных окатышей при их подаче в зону под

электрическими дугами, рассмотрены условия снижения пылеуноса и угара металла из зоны испарения металла. При этом решаются задачи ускорения процессов плавления окатышей в 2-3 раза с понижением угара металла до 2-3 % по сравнению с технологией электроплавки стали при подаче окатышей вне зоны испарения металла, при традиционной подаче ЖМО на шлаковую ванну дуговой печи.

Идея использования металлизированного сырья в различном виде, а также переработка железосодержащих отходов с предварительным брикетированием для дальнейшего использования давно нашла применение и становится более актуальной в моменты ухудшения ситуации с металлическим ломом [8, 22, 32, 38, 39, 44, 65, 73, 74, 75, 103, 104, 120, 135, 141, 157, 163, 171, 175, 176]. Продолжают разрабатываться новые способы производства и использования металлизированного сырья [24, 79].

Прямое восстановление развивалось как одно из направлений процесса совершенствования металлургического производства. Техническими предпосылками, обусловившими прогресс в рассматриваемой области в 1960-1970-х годах, явились успехи в обогащении и окисковании железорудного сырья, производстве восстановительных газов, добыче, транспортировке и использовании природного газа и нефти. Среди причин социально-экономического характера, стимулировавших развитие прямого восстановления за рубежом, можно назвать: сложившееся в мире распределение ресурсов железорудного сырья, природного и попутного газа между развитыми и развивающимися странами, стремление последних строить национальную экономику на базе собственных ресурсов с привлечением опыта и знаний, накопленных в передовых странах, а также ограничение рынка сбыта в развитых капиталистических странах [136]. Первоначально предполагалось, что значительная часть металлизированного сырья будет использоваться в доменных печах с целью экономии дорогого и дефицитного кокса. Однако использование металлизированного сырья, в виде окатышей получило широкое распространение при выплавке стали в дуговых электропечах. В условиях значительных колебаний цен на качественный лом применение металлизированных материалов в сочетании с загрязненным примесями дешевым ломом позволяет выплавлять сталь требуемого качества с приемлемыми издержками производства. В нашей стране основной предпосылкой развития прямого восстановления железа является растущая потребность качественной металлургии в чистой по примесям шихте при достаточной обеспеченности ресурсами природного газа.

Принцип полного использования образующихся металлоотходов и амортизационного металлолома исключает постановку вопроса о целесообразности замены лома металлизированными материалами, если рассматривать его в широком смысле

применительно к выплавке стали массового потребления. Однако такая замена не исключается при выплавке в электропечах и конверторах качественной стали, где она продиктована требованиями обеспечения качества металла. В условиях планового хозяйства стальной лом и железо прямого восстановления не являются конкурирующими материалами. В шихте сталеплавильных агрегатов они могут дополнять друг друга, обеспечивая необходимый для производства стали той или иной марки комплекс свойств шихты – химический состав, технологичность, возможность механизации и автоматизации процесса плавки и др. Рост потребления стали, расширение числа и степени сложности производимых из нее изделий сопровождаются ухудшением качества амортизационного лома – снижением его насыпного веса, загрязнением цветными металлами и посторонними примесями.

Аргументом в пользу процесса прямого восстановления является меньшее, чем при схеме доменная печь – конвертер, загрязнение окружающей среды. При прямом восстановлении с использованием природного газа по сравнению с традиционной схемой выбросы сернистых соединений могут быть уменьшены более чем в десять раз, в несколько раз снижены выбросы углерода и пыли. Также можно ожидать снижения расхода воды, значительная доля которой приходится на доменное производство и предшествующие ему стадии подготовки сырья.

Положительным моментом при плавке в дуговых электропечах с применением металлизированного сырья является и снижение уровня шума по сравнению с плавкой на ломе в среднем на 3-4 дБ, а в отдельные периоды и более ввиду стабилизации горения дуги.

Основными показателями состава металлизированных материалов являются содержание пустой породы или железа общего, степень металлизации, содержание углерода и примесей.

Руды и концентраты большинства железорудных месторождений мира содержат в преобладающих количествах кремнезем, поэтому основность пустой породы металлизированного сырья, как правило, не превышает 0,3. При содержании в шихте 50-70% продуктов прямого восстановления количество шлака в случае повышенного содержания пустой породы может достигать до 200-300 кг/т жидкой стали. Помимо возрастания расхода электроэнергии, извести и снижения скорости плавления шихты, при увеличении количества шлака растут потери железа со скачиваемым шлаком.

Степень металлизации характеризует количество кислорода или окислов железа в металлизированных материалах, представленных FeO (недовосстановленные окислы исходного сырья) и Fe_2O_3 (продукты вторичного окисления губчатого железа). Без

большой погрешности можно считать, что вторичное окисление незначительно и в металлизированных материалах кислород присутствует в виде закиси железа $\text{Fe}_{0,95}\text{O}$.

При плавлении металлизированных материалов окислы железа частично восстанавливаются углеродом, содержащимся в самих материалах и в жидком металле, частично переходят в шлак и удаляются вместе с ним. Восстановление железа в условиях электроплавки обходится дороже, чем, например, в шахтной печи, так как тепловой к.п.д. здесь ниже, притом стоимость электрической энергии выше, чем энергии, получаемой от сжигания газа. Кроме того, ввиду относительно малой поверхности раздела шлак-металл в электропечи кинетические возможности восстановления в этом агрегате менее благоприятные, чем в шахтной печи. Однако наличие в металлизированном сырье 0,8-1,5 % кислорода является желательным с точки зрения улучшения условий его плавления, так как улучшается тепло- и массообмен в ванне в период плавления и получает развитие реакция обезуглероживания (происходит перемешивание металла и шлака пузырьками CO).

Со степенью металлизации тесно связан показатель – содержание углерода в металлизированных материалах. Идеальным является такое содержание углерода, чтобы его было достаточно для довосстановления окислов железа металлизированного продукта и легирования стали. Если пренебречь частью окислов железа, требуемых для создания определенной окисленности шлаков в период плавления, соотношение между углеродом и кислородом в губчатом железе должно быть не менее стехиометрического по реакции обезуглероживания (восстановления) $X_{\text{C}}/X_{\text{O}_2} \geq 0,75$. При $X_{\text{Fe}}_{\text{общ}} = 91\%$ содержание углерода в металлизированном материале, используемом при выплавке стали, содержащей 0,2 % С, должно быть не ниже 0,8 и 1,8 % при степени металлизации 96 и 90 % соответственно.

Для поддержания требуемой интенсивности тепло- и массообмена в ванне в период непрерывного проплавления металлизированных окатышей необходимо, чтобы они содержали оптимальные с точки зрения развития реакции обезуглероживания количества кислорода и углерода. Металлизированные материалы всегда имеют недовосстановленные окислы железа, количество которых может изменяться в довольно широких пределах и служит одним из важнейших показателей процесса прямого восстановления. За исходную характеристику качества губчатого железа обычно принимается содержание кислорода, а содержание углерода рассматривается, как производная.

При использовании металлизированных окатышей, содержащих не более 0,015 % Р, и лома – не более 0,06 % Р (при количестве окатышей в шихте 50-70 %) оптимальная основность шлака для окатышей с различным содержанием кислых окислов составляет 1,2

– 2,0. Это означает, что в типичных случаях выплавки стали с применением металлизированных окатышей основность шлаков в период плавления может быть ниже, чем при плавке на ломе. Данное положение объясняется не особыми условиями протекания реакции дефосфорации, а относительно низким содержанием фосфора в окатышах и повышенным количеством шлака, получающимся при офлюсовании пустой породы до требуемого значения основности.

В ряде случаев требуемое содержание фосфора в металле по расплавлении обеспечивается при работе на шлаках относительно невысокой основности, не превышающей 1,5. Следует, однако, отметить, что помимо обеспечения требуемой степени дефосфорации, основность шлака в период плавления окатышей должна удовлетворять требованиям, вытекающим из условий обеспечения заданного срока службы футеровки.

Железо прямого восстановления обычно содержит малое количество хрома, никеля, меди, свинца, олова, цинка и др. ввиду чистоты железорудного сырья по указанным элементам, что создает предпосылки для производства стали с низким и стабильным содержанием этих примесей, недостижимым при использовании в шихте электропечи привозного лома, часто загрязненного указанными примесями.

Насыпная плотность, металлизированного сырья изменяется в сравнительно узких пределах и превышает характерный для амортизационного лома хорошего качества показатель. Поэтому эффективность использования емкости бункеров в случае использования, например, окатышей или брикетов выше, чем лома. Наиболее высокой насыпной массой обладают брикеты из металлизированных материалов.

Характерным для губчатого железа является очень большая удельная поверхность, включая внешнюю поверхность кусков и внутреннюю поверхность открытых пор. Большая величина внутренней поверхности железа прямого восстановления объясняется высокой пористостью и очень малым размером пор, возникающих в результате изменения кристаллографической структуры при превращении окислов в металлическое железо. Низкой теплопроводностью в сочетании с большой удельной поверхностью и химической активностью восстановленного железа определяют его повышенную склонность к окислению.

Плавка стали в дуговой электропечи с использованием в шихте продуктов прямого восстановления железа отличается от плавки на ломе в основном технологией периода плавления. Это объясняется различием физических свойств, а также состава лома и металлизированного сырья. Различие в химическом составе сказывается на технологии плавки и после расплавления шихты, однако не столь сильно, как в период плавления [136].

Эффект применения железа прямого восстановления при выплавке стали в значительной мере основывается на росте производительности, достигаемом сокращением длительности рафинирования и отчасти вспомогательных операций.

Последовательность технологических операций при плавке с порционной загрузкой железа прямого восстановления практически не отличается от последовательности операций плавки на ломе. При содержании в шихте менее 40 % окатышей или губчатого железа их вводят в завалку, при большем содержании производится догрузка шихты в печь (подвалка) после проплавления завалки.

Плавление лома происходит в основном за счет растворения или плавления кусков в ванне жидкого металла, образующейся на подине после проплавления колодцев. При этом куски лома под действием собственного веса опускаются в жидкий металл. При нагреве сверху дугой слоя окатышей значительной толщины расплавленный металл заполняет свободное пространство между отдельными окатышами и застывает, не проникая глубоко в слой. Под электродами формируется небольшая ванна жидкого металла. Увеличение ее объема происходит в результате плавления шихты на сравнительно небольшой площади поверхности раздела между расплавом и твердыми окатышами. Самопроизвольное обрушение окатышей в жидкий металл затрудняется из-за склонности их к спеканию и малой плотности. Для улучшения условий плавления шихты из губчатого железа или металлизированных окатышей применяют различные технологические приемы, заключающиеся в изменении распределения и порядка загрузки этих материалов в печь.

Металлизированные материалы содержат заметное количество кислорода в виде недовосстановленных окислов железа. Дополнительное количество кислорода поступает за счет окисления развитой поверхности губчатого железа кислородом атмосферы печи, чему способствует длительный нагрев окатышей. Содержание углерода в металлизированных окатышах и губке обычно недостаточно для восстановления поступающих с этими материалами и образующихся в процессе плавления окислов железа. Поэтому при высоком содержании металлизированных материалов в шихте в нее дополнительно вводится углерод графитом или чугуном, присаживаемый в завалку.

Плавление окатышей сопровождается восстановлением окислов железа углеродом – кипением ванны, улучшающим массо- и теплообмен. Однако при относительно невысокой температуре ванны, обусловленной постоянным присутствием значительного количества твердой шихты, реакция обезуглероживания в системе шлак-металл протекает неполностью и содержание окислов железа в шлаках периода плавления превышает равновесное с углеродом жидкого металла.

Технология плавки с порционной загрузкой применима, когда количество металлизированного сырья в шихте невелико и капитальные затраты на сооружение устройств непрерывной загрузки неоправданны. Увеличение количества окатышей в шихте более 20-30% затрудняет ведение плавки и ухудшает ее показатели. Положительный эффект от применения продуктов прямого восстановления при данном способе выплавки получается только от снижения примесей в шихте и определяется количеством и составом продуктов прямого восстановления.

Характерным моментом технологии плавления с непрерывной загрузкой является наличие в печи жидкого металла, на поверхность которого загружается с заданной скоростью металлизированное сырье. Первоначальная ванна жидкого металла может быть получена оставлением части жидкой стали предыдущей плавки в печи или расплавлением завалки, состоящей преимущественно из металлического лома. Скорость загрузки металлизированного сырья регулируют таким образом, чтобы в жидкой ванне всегда имелось нерасплавленное металлизированное сырье в количестве, обеспечивающем устойчивый характер горения дуг. При этом скорость загрузки металлизированного сырья равняется скорости его плавления. Также в работе [136] было показано, что если сравнивать плавку на металлизированных окатышах с плавкой на ломе, то основное различие между ними в том, что в первом случае, используя специальную технологию ведения плавки, учитывающую специфические свойства шихты, можно достичь более высокой производительности при некотором увеличении расхода электроэнергии.

С помощью математического моделирования процесса плавления металлизированного окатыша в шлаковом расплаве [98] изучены факторы, влияющие на скорость плавления окатыша и выявлены звенья, лимитирующие этот процесс. Определены оптимальные условия плавления металлизированных окатышей в ДСП. В ходе опытов изучали длительность плавления, изменение кажущейся плотности, структуры и содержания углерода в процессе нагрева и плавления окатышей. В качестве объекта исследования были выбраны металлизированные окатыши, изготовленные из концентрата Лебединского ГОКа, состав которых приведен в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Химический состав металлизированных окатышей, %.

	$Fe_{общ}$	$Fe_{мет}$	FeO	C	SiO_2	S	P	φ
БМК	87,4	72,6	12,3	1,5	7,9	0,01	0,018	0,83
ОМК I	89,1	83,0	7,6	3,5	4,53	0,01	0,010	0,93
"- II	91,5	82,3	8,5	1,9	3,85	0,01	0,010	0,90
"- III	91,8	85,4	8,0	1,0	4,42	0,01	0,010	0,93
"- IV	92,1	85,4	8,6	0,01	4,52	0,01	0,012	0,93

φ – степень металлизации

Важным показателем является содержание углерода в окатышах. Длительность плавления окатышей колебалась от 36 сек. для безуглеродистых и до 14 сек. для окатышей с содержанием углерода 3,5% (рис.1.1).

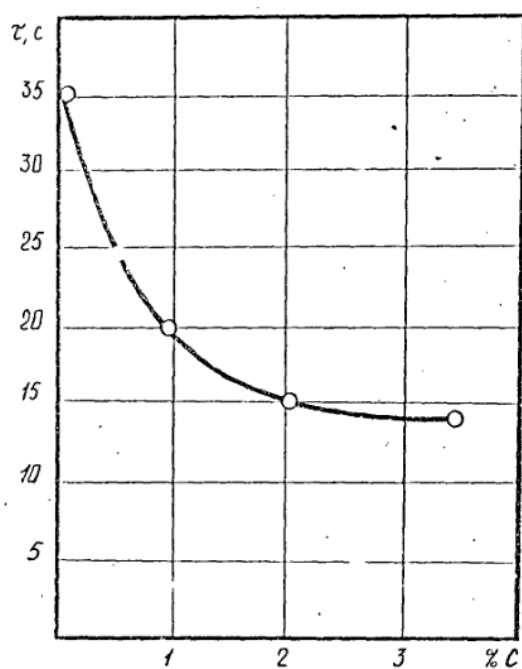


Рис. 1.1. Влияние содержания углерода на длительность плавления окатышей.

Проведенные исследования в работе [98] позволили сделать следующие выводы:

- 1) При попадании в шлаковый расплав на поверхности безуглеродистого окатыша намерзает шлаковая корка, толщина которой достигает 30% радиуса окатыша. На углеродистых окатышах толщина шлаковой корки достигает 10% радиуса окатыша.
- 2) Нагрев окатыша приводит к возрастанию его кажущейся плотности. Увеличение кажущейся плотности начинается при температуре выше 1000°C. Изменение плотности связано с процессом спекания металлической фазы окатыша.
- 3) В результате интенсивного взаимодействия содержащихся в углеродистом окатыше углерода и остаточных оксидов железа образуется оксид углерода, который, выделяясь по трещинам и порам, разрушает шлаковую корку и перемешивает прилегающие к окатышу слои шлака, тем самым улучшая теплоподвод и ускоряя плавление окатыша. При нагреве безуглеродистых окатышей газовыделение отсутствует. Нагрев и плавление окатыша происходит в спокойном шлаке, а длительность плавления в 2 раза больше, чем углеродистых.
- 4) Математическое моделирование процесса плавления позволило установить, что для обеспечения интенсивного плавления металлизированного окатыша в шлаковом расплаве необходимо перемешиванием шлака поддерживать его эффективную

теплопроводность не менее 50-60 Вт/м·К. Уменьшение теплопроводности шлака приводит к быстрому возрастанию длительности плавления окатышей. При увеличении теплопроводности шлака выше 50-60 Вт/м·К длительность плавления окатыша почти не сокращается. Лимитирующим звеном становится шлаковая корка на поверхности окатыша, длительность существования которой достигает 60% длительности плавления окатыша.

5) Оптимальные условия плавления металлизированных окатышей в дуговой печи обеспечиваются при их непрерывной загрузке со скоростью, исключающей накопление окатышей в ванне. Температуру металла при этом следует поддерживать в пределах 1570 – 1600°C.

6) Интенсивное кипение ванны позволяет вести загрузку металлизированных окатышей с максимальной скоростью до 30 кг/мин·МВт без их накопления. Образование в печи пенистого слабоперемешиваемого шлака ухудшает условия плавления окатышей, а скорость их загрузки без накопления в шлаке не превышает 26 кг/мин·МВт. Присадки окисленных окатышей для стимулирования кипения резко повышают окисленность шлака, увеличивают вероятность вскипания и требуют дополнительных затрат энергии.

7) Кислородная продувка металла в период непрерывного плавления металлизированных окатышей интенсифицирует кипение ванны и улучшает тепломассообмен в шлаке, ускоряя при этом плавление окатышей. Скорость загрузки окатышей в печь может быть повышена до 33 кг/мин·МВт без опасности образования спеков. Длительность плавления при этом сокращается на 9,7%, а расход электроэнергии на 5,8%.

8) Без продувки кислородом скорость плавления окатышей в дуговой печи определяется подводом тепла к окатышу. При кислородной продувке скорость плавления лимитируется длительностью плавления самого окатыша. Эти условия достигаются уже при интенсивности продувки 1200 м³/ч. Увеличение интенсивности продувки до 2000 м³/ч более не приводит к росту скорости плавления и снижению расхода электроэнергии.

9) Повышение степени металлизации окатышей позволяет увеличивать их среднюю скорость загрузки в печь как на плавках с применением кислородной продувки, так и без нее.

Поведение металлизированных окатышей на приведенных выше результатах исследований в какой-то степени соответствует поведению других видов металлизированного сырья при их добавке в металлошихту в процессе производстве полупродукта в ДСП.

Вместе с этим применение металлизированного сырья влечет за собой изменения в технологии выплавки стали, при которых роль шлаков в процессе производства стали исключительно велика. Шлаковый режим, определяемый количеством и составом шлака, его температурой, а также временем и способом отдачи шлакообразующих, оказывает большое влияние на качество готовой стали, стойкость футеровки и производительность сталеплавильного агрегата.

1.2.2. Использование ГБЖ при выплавке стали в ДСП

Один из наиболее эффективных способов понижения чувствительности железа прямого восстановления к поглощению влаги и окислению – его горячее брикетирование. Железо прямого восстановления выгружается из печи в горячем состоянии и может частично или полностью сразу же быть подвергнуто горячему брикетированию. При этом происходит его значительное уплотнение с устранением неприятностей, обусловленных механическими напряжениями, окислением и разогревом его при транспортировке, хранении и перегрузках.

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. Следует отметить, что использование данного сырья становится экономически привлекательным при замене им чугуна и дорогостоящего вида лома в металлошихте даже при ухудшении технологических показателей электроплавки. Точно известный однородный химический состав ГБЖ со стабильными свойствами позволяет снизить вероятность непадания в заданный химический состав полупродукта при его производстве.

Основные преимущества использования такого сырья хорошо известны, но недостаточно широко освещаются в литературе отрицательные моменты от влияния ГБЖ на стойкость футеровки печи, а также отсутствуют стандартные приемы работы с таким сырьем. Отмечены разные, в том числе и противоречивые мнения о влиянии ГБЖ на технологические показатели электроплавки – расходы энергоносителей, шлакообразующих добавок, стойкость футеровки печи и другие показатели. Все это зависит от ряда факторов: конструкции ДСП, энерготехнологических режимов, характеристик ГБЖ, способа загрузки ГБЖ в печь и прочих. Особенности использования

ГБЖ в металлошихте и анализ его влияние на показатели электроплавки показаны в работах [51, 62, 63, 64, 122, 130, 131, 132, 159, 161, 172, 173, 174, 180, 192].

ДСП является технологически гибким агрегатом и позволяет использовать разные типы шихты. При порционной загрузке шихты доля ГБЖ в завалке ограничена, ее величина зависит от характеристик самой печи и режимов ее обслуживания, определяемых оптимальными затратами [16, 73, 164, 185, 190].

В данной работе в качестве добавки в металлошихту использовали ГБЖ производства ОАО “Лебединский ГОК”, которое представляет собой брикеты, полученные методом прямого восстановления из предварительно окомкованной железной руды и затем спрессованные под давлением [43, 83, 91, 99]. Типовой размер брикета 110*50*30 мм, плотность - 5 г/см³. Типовая степень металлизации ГБЖ составляет 93,1%. Химический состав ГБЖ следующий: $Fe_{мет} > 83 \%$, $SiO_2 < 4,5 \%$, $C > 1\%$, $S < 0,02 \%$, $P < 0,015 \%$, $Fe_{общ} > 90 \%$. Содержание серы и фосфора в ГБЖ находится на относительно низком уровне. Важно отметить высокое содержание диоксида кремния в ГБЖ, что значительно влияет на основность шлака в печи.

В 2015 году на металлургических предприятиях России начали активно применять ГБЖ. Так, на АО “ВТЗ” и ПАО “ТАГМЕТ” при выплавке полупродукта в ДСП-150 в качестве металлошихты используют добавку ГБЖ в завалку, что является хорошей альтернативой дорогостоящему передельному чугуна и сортам лома, чистым по вредным примесям. В условиях данных предприятий проводили анализ влияния добавки ГБЖ на качество производимой стали, технологические показатели плавки, в том числе и стойкость футеровки ДСП. В настоящей работе представлены результаты проведенного анализа.

1.2.3. Основные преимущества использования ГБЖ

Горячебрикетированное железо является одним из видов металлизированного сырья и в настоящее время широко используется в качестве добавки в металлошихту при выплавке стали в электропечи. Среди основных преимуществ ГБЖ можно выделить следующие:

- отсутствие примесей цветных металлов в ГБЖ, что позволяет выплавлять марки стали, чистые по данным примесям;
- низкое содержание серы и фосфора в ГБЖ (касательно ГБЖ, используемого в процессе проведения данной работы) позволяет получать полупродукт с низким

содержанием данных примесей и вести процесс дефосфорации с пониженной основностью шлака;

- точно известный однородный химический состав ГБЖ позволяет прогнозировать количество примесей в производимом полупродукте, обеспечить гарантированное попадание в заданную марку стали и снизить уровень брака при производстве стали, открывается возможность производства более дорогих высококачественных марок сталей;

- высокая удельная насыпная плотность завалки позволяет уменьшить количество подвалок, что приводит к снижению времени плавки и увеличению производительности ДСП. Насыпная плотность, металлизированного сырья изменяется в сравнительно узких пределах и превышает характерный для амортизационного лома хорошего качества показатель. Поэтому эффективность использования емкости бункеров в случае использования, например, окатышей или брикетов выше, чем лома. Наиболее высокой насыпной массой обладают брикеты из металлизированных материалов;

- относительно низкая стоимость ГБЖ, по сравнению с передельным чугуном и дорогостоящим видом лома делает привлекательным его использование в качестве шихтового материала;

- при использовании ГБЖ в шихте снижается вероятность повреждения футеровки при завалке по сравнению с загрузкой тяжеловесным ломом;

- стабильный фракционный состав ГБЖ создает благоприятные условия для его хранения, транспортировки и проведения погрузочно-разгрузочных работ. В сравнении с ломом ГБЖ не нужно сортировать, резать, удалять дополнительные засоры;

- использование ГБЖ позволяет снизить зависимость предприятий от рынка скрапа и, в первую очередь, его наиболее качественных сортов, оптимизировать процесс обеспечения сталеплавильных производств металлоресурсами, улучшить сортамент выплавляемой стали.

Преимущества использования металлизированного сырья в шихте показаны в работах [52, 61, 130, 132, 141, 163, 171, 174, 181, 184, 192].

Если сравнивать производственную цепочку в целом от производства металлизированного сырья до получения полупродукта с использованием доменного производства, то аргументом в пользу процесса прямого восстановления является меньшее, чем при схеме доменная печь – конвертер, загрязнение окружающей среды. При прямом восстановлении с использованием природного газа по сравнению с традиционной схемой выбросы сернистых соединений могут быть уменьшены более чем в десять раз, в несколько раз снижены выбросы углерода и пыли. Также можно ожидать снижения

расхода воды, значительная доля которой приходится на доменное производство и предшествующие ему стадии подготовки сырья. Производство ГБЖ не требует использования дефицитного коксующегося угля, а природный газ вообще можно заменить на газифицированный уголь. Следует отметить, что процесс прямого восстановления железа – самый экологически чистый из всех процессов получения железа. Технология производства ГБЖ позволяет исключить при переделе такие мощные источники выбросов вредных веществ, как коксохимический, агломерационный и доменный процессы, входящие в традиционную схему производства. Отсутствуют и твердые отходы в виде шлака, который обычно содержит окислы кальция, алюминия, магния, железа, марганца, соединения серы.

Положительным моментом при плавке в дуговых электропечах с применением металлизированного сырья является и снижение уровня шума по сравнению с плавкой на ломе в среднем на 3-4 дБ, а в отдельные периоды и более ввиду стабилизации горения дуги [136].

Достаточный уровень прочности горячебрикетированного железа обеспечивает транспортировку, складирование и загрузку его в электропечь с образованием относительно небольшого количества мелочи.

Продукты прямого восстановления магниты. При погрузке электромагнитом ГБЖ достигается не меньшая производительность, чем при погрузке стального лома хорошего качества.

1.2.4. Проблемы при использовании ГБЖ

В литературе недостаточно широко освещаются отрицательные моменты от влияния ГБЖ и отсутствуют стандартные приемы и рекомендации по работе с таким сырьем. К отрицательным моментам, связанным с влиянием ГБЖ на энерготехнологические показатели плавки можно отнести следующее.

В ряде случаев при использовании добавки ГБЖ при выплавке стали в ДСП отмечено повышение расхода энергоносителей и шлакообразующих материалов [61, 62, 136, 184]. Это связано с наличием оксидов железа в ГБЖ и значительным содержанием оксида кремния, что приводит к образованию кислых шлаков. Отмечено также увеличение времени плавки и снижение выхода годного.

Несмотря на то, что металлизированное сырье, в том числе ГБЖ, как правило, значительно чище по содержанию в нем фосфора, по сравнению с металлическим ломом, в ряде случаев при работе на таком сырье используют технологическую схему, присущую

при плавке 100% лома и расход извести для проведения процесса дефосфорации не всегда бывает обоснован.

Сопоставляя энергетические потребности для процессов плавления лома и металлизированных материалов нужно принимать во внимание различие их по температуре и количеству получаемого по расплавлению железа. При плавке на ломе концом плавления можно условно считать достижение ванный температуры 1530°C , хотя на практике эта температура бывает ниже. Плавление окатышей ведут при температуре примерно 1570°C . На рис.1.2 приведена рассчитанная зависимость потребности энергии на плавление 1 т металлизированных окатышей с различным содержанием пустой породы при степенях металлизации (ϕ) 90 и 94%, содержания закиси железа в шлаке 15%, основности 1,7.

С ростом содержания пустой породы увеличивается расход энергии на плавление и перегрев шлака и незначительно снижаются затраты тепла на восстановление железа. Расчеты показывают [136], что затраты тепла на шлакообразование при повышении на 1 % пустой породы превышают затраты на восстановление при снижении степени металлизации на 1% примерно в 3 – 3,5 раза. Отсюда следует, что с позиций энергетики снижение содержания пустой породы в губчатом железе более эффективно, чем повышение степени металлизации. Энергетические потребности плавления окатышей при температуре ванны 1570°C примерно на 30 – 35% выше, чем лома. Они возрастают до 35 – 40%, если для лома принять температуру 1530°C . Следовательно, применение металлизированных материалов взамен лома потенциально всегда связано с повышением, по крайней мере на 30%, потребностей в энергии.

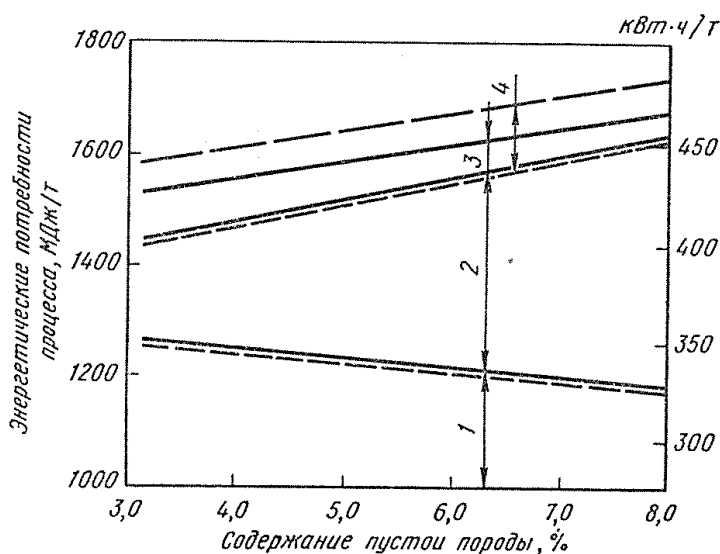


Рис.1.2. Зависимость потребности энергии на плавление 1 т металлизированных окатышей от содержания в них пустой породы: 1 – энтальпия жидкого металла; 2 – энтальпия шлака;

3 – теплота восстановления окислов железа при $\phi = 94\%$; 4 - то же, при $\phi = 90\%$.

Характер изменения расхода электроэнергии на плавку в целом при увеличении количества металлизированных материалов в шихте обусловлен действием двух групп факторов. Увеличение расхода связано с ростом энергетических потребностей плавления и небольшим снижением коэффициента использования электроэнергии. Сокращению расхода способствует снижение потерь тепла от замены количества подвалок шихты или ее непрерывной загрузкой и от уменьшения длительности доводки при совмещении окислительного периода с плавлением, а также меньшего содержания примесей в шихте.

Относительный расход электроэнергии с ростом доли металлизированных материалов при плавке в крупных печах (50-130 т) вначале остается почти постоянным, затем возрастает примерно на 2-2,5% на каждые 10% губчатого железа в шихте при непрерывной загрузке. У малых печей четко выражено снижение расхода до 15% при содержании металлизированных материалов в шихте 20 – 30%. Такой характер изменения рассматриваемой зависимости объясняется изменением расхода электроэнергии на собственно плавление шихты, доводку и потерь тепла при подвалках лома. Первая из этих статей возрастает с увеличением доли окатышей, вторая вначале убывает, затем после полного совмещения окислительного периода с периодом плавления остается постоянной, третья резко уменьшается в области 25 – 35%, где одна подвалка исключается благодаря непрерывной загрузке. Наложение этих затрат и дает результирующую картину. Различие между крупными и малыми печами обусловлено большей относительной величиной расхода электроэнергии на доводку и потерями тепла при подвалках у малых печей. Уменьшение этих статей при замене лома окатышами у малых печей сказывается более резко на общем расходе электроэнергии, что проявляется в снижении относительного расхода.

При плавке губчатого железа с разовой завалкой расход электроэнергии с увеличением его доли до 50 – 70% возрастает в большей степени, чем при непрерывной загрузке из-за ухудшения теплопередачи.

Увеличение количества губчатого железа в шихте неоднозначно сказывается на показателях плавки, качестве стали и конструктивном оформлении загрузки металлизированных материалов в печь. Несмотря на разнообразие требований, которым должно удовлетворять оптимальное содержание железа прямого восстановления в шихте, имеются некоторые общие принципы решения этого вопроса. Применение 20-30% металлизированных материалов с загрузкой их теми же способами, что и лома (корзиной, лотками), приводит к снижению производительности (до 10%) и повышению расхода электроэнергии (на 10-15%). Дальнейшее увеличение количества губчатого железа в

шихте при разовой его загрузке сопровождается значительными осложнениями в ведении процесса расплавления и резким ухудшением показателей. Поэтому такой способ оправдан, когда по соображениям экономики или технологии достаточно применять небольшие количества губчатого железа (до 30%) и затруднительно организовать непрерывную загрузку.

При наличии системы непрерывной загрузки возможности варьирования количества металлизированных материалов в шихте расширяются и оптимальное их содержание определяется эффектом, получаемым от снижения издержек производства (путем повышения производительности, снижения стоимости шихты) и повышения качества стали. Оптимальным содержанием окатышей в шихте с точки зрения минимума затрат по переделу будет содержание, отвечающее максимуму производительности. Для металлизированных материалов, содержащих до 5% пустой породы, с высокой степенью металлизации (92-94%) оптимум, судя по опыту зарубежных цехов, находится в пределах 50-70%. Это положение основывается на характерном для сложившейся структуры расходов по переделу в электросталеплавильных цехах соотношении стоимости электроэнергии и величины условно постоянных расходов, при котором небольшие расходы на дополнительную электроэнергию перекрываются экономией от повышения производительности. Повышение доли окатышей может быть оправдано в случае, когда оно диктуется соображениями получения в электропечах стали с очень низким уровнем примесей цветных металлов, а также стали, сочетающей малое содержание серы и азота.

При плавлении металлизированных материалов в результате восстановления окислов железа может выделяться довольно большое количество СО (до 10 м³/т), возможно полное дожигание которого в печи могло бы заметно улучшить структуру теплового баланса. Однако здесь имеются препятствия принципиального характера. Высокая температура, развивающаяся при сжигании в рабочем пространстве нагретой до 1500-1600 °С окиси углерода, приводит к двум нежелательным явлениям: перегреву футеровки верхней части стен и свода, особенно в районе газоотводящего патрубка системы газоотсоса, и повышению степени недожога СО в результате возрастания степени диссоциации продуктов сгорания с ростом температуры. При таком сжигании тепло, передающееся ванне за счет излучения футеровки и пламени, сравнительно невелико – не более 30%.

При использовании добавки ГБЖ также отмечено снижение общей стойкости футеровки печи и повышение расхода огнеупорных материалов для ее обслуживания [51, 63, 64, 136]. Зафиксировано снижение стойкости огнеупорной части свода печи и

повышение расхода графитированных электродов, что связано с повышенной тепловой нагрузкой на печь.

Тем не менее, несмотря на ухудшение некоторых технологических показателей плавки, использование ГБЖ в металлошихте все равно остается экономически привлекательным.

1.3. Стойкость футеровки ДСП и влияние на нее металлизированного сырья

На себестоимость получаемой стали и производительность ДСП влияет стойкость футеровки. Стойкость футеровки дуговой сталеплавильной печи зависит от ряда факторов: энерготехнологического режима плавки, химического состава шлака и его температуры, количества шлака и поддержания его во вспененном состоянии, качества обслуживания футеровки печи, применяемых материалов и пр.

Важным показателем для оценки стойкости магнезиальной футеровки являются характеристики печного шлака [10, 15, 28, 29, 40, 49, 125, 153, 154]. 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 отношении CaO/SiO_2 менее 2,5 агрессивность шлака, повышенная [55], что отражается на стойкости огнеупорной футеровки. Для повышения срока службы огнеупорного кирпича в него добавляют графит (до 15%), который обладает низкой смачиваемостью шлаком и препятствует проникновению жидкой шлаковой фазы в огнеупор [124, 138, 144]. Смачивание огнеупора определяется в основном химическим составом шлаков и огнеупоров, а также температурой шлака. Повышение окисленности шлака также отрицательно влияет на износ футеровки ДСП.

В работе [119] при анализе конвертерных шлаков установлено, что главным параметром, определяющим смачивание шлаком периклазового материала, является содержание в шлаке FeO. При содержании FeO более 21% угол смачивания шлаком (с 5% MgO) поверхности периклаза менее 18° , а при снижении концентрации FeO до 5% смачивание изменяется на отрицательное, угол смачивания превышает 90° . Модификация химического состава шлака с увеличением в нем MgO вызывает ухудшение смачивания периклазового материала, причем степень повышения угла смачивания сильно зависит от окисленности шлака: при 22% FeO увеличение содержания MgO от 5 до 12% меняет угол смачивания от 10 до $28-45^\circ$ (смачивание остается положительным), при 15% FeO

аналогичное повышение содержания MgO приводит к изменению угла до 87° , т.е. смачивание практически отсутствует.

Основным компонентом в составе периклазоуглеродистых изделий, используемых при футеровке ДСП, является периклаз (основа MgO). Поэтому с целью снижения химического воздействия шлака на огнеупорную футеровку состав шлака корректируют, добавляя в него MgO -содержащий материал. Добавка MgO -флюса в шлаке позволяет обеспечить его насыщение оксидом магния и приблизить его концентрацию в шлаке к равновесной, тем самым снижая растворение периклазоуглеродистой футеровки в шлаке [5, 11, 26, 30, 37, 105, 128, 156].

Также кроме защиты футеровки необходимо учитывать влияние магнезиальных флюсов на вспенивание шлаков и их влияние на огнеупорную футеровку печи [14, 58, 101]. Для того, чтобы шлак хорошо пенился он должен обладать определенными физико-химическими характеристиками. По разным источникам для поддержания периклазоуглеродистой футеровки в удовлетворительном состоянии рекомендуемое оптимальное содержание MgO в печном шлаке должно находиться на уровне 8-12%, основность шлака на уровне 2-3 при содержании FeO в шлаке 15-30% в зависимости от периода плавки и температуры расплава. Более подробная информация о формировании магнезиальных шлаков, обладающих низким агрессивным воздействием на футеровку ДСП и высокими рафинирующими свойствами, показана в работах [14, 46, 57, 58, 66, 88, 89, 90, 101, 189].

При выплавке стали в ДСП важно учитывать текущее состояние рабочей футеровки и поддерживать ее в надлежащем виде в течение всей кампании печи. Одними из основных мероприятий по уходу за футеровкой печи, помимо поддержания состава шлака на требуемом уровне, являются торкретирование футеровки, заправка подины и откосов печи. Неудовлетворительное состояние огнеупорной футеровки может привести к снижению срока ее службы или аварийному проходу металла через металлический кожух, что в конечном итоге приведет к увеличению времени простоя цеха, трудовым затратам при замене футеровки и снизит общую производительность печи [12, 46, 66, 145, 179]. Своевременное проведение горячих ремонтов магнезиальной футеровки с использованием высококачественных заправочных материалов, торкрет-масс и профессионального оборудования применяя квалифицированный комплексный подход позволяет достигать высоких стойкостей футеровки.

Разрушение футеровки печи включает в себя химический износ, обусловленный шлаковой коррозией огнеупора, которая определяется окислением углеродной составляющей огнеупора и миграцией оксидной составляющей огнеупора (MgO) в

шлаковый расплав, а также термический износ, обусловленный термическими напряжениями, возникающими вследствие нагрева и охлаждения футеровки и значительного градиента температуры по толщине футеровки. Важный фактор, определяющий динамику шлаковой коррозии огнеупора, является окисленность шлака и степень насыщенности шлакового расплава огнеупорной фазой (MgO) [100, 129].

Качество используемого периклазоуглеродистого кирпича и магнезиальных масс в огнеупорной кладке определяется в основном чистотой используемого периклаза, типом графита, связующими добавками и способом изготовления. Для снижения скорости износа периклазоуглеродистого огнеупора при его производстве используют крупнокристаллический периклаз и графит с повышенной чистотой по содержанию примесей, особенно SiO_2 , снижают пористость изделия, используют различные антиоксиданты и добавки в составе огнеупоров и пр. [2, 3, 4, 6, 25, 28, 35, 50, 53, 93, 115, 116, 117, 137, 187]. Используют различные способы формования [54]. В локальных зонах футеровки стен печи, подверженных наибольшему износу (зоны электродов, зоны газокислородных фурм) используют более качественный дорогостоящий огнеупорный материал либо увеличивают толщину футеровки в данной зоне с целью обеспечения равномерного износа футеровки по всему периметру футеровки печи.

Использование металлизированного сырья, в частности ГБЖ в металлошихте отражается на стойкости футеровки печи и расходе энерготехнологических показателей плавки, что обусловлено изменением количества и состава шлака, вызванным значительным содержанием пустой породы в таком сырье. Наличие оксидов железа в таком сырье требует дополнительных энергетических затрат для восстановления железа. В связи с этим появляется необходимость повышения расхода электрической энергии.

Последовательность технологических операций при плавке с порционной загрузкой железа прямого восстановления практически не отличается от последовательности операций плавки на ломе. В работе [136] приведен обзор исследований различных способов загрузки железа прямого восстановления в ДСП малой емкости. В Швеции при выплавке стали в печах малой емкости, загружаемых через рабочее окно, губчатое железо загружали из контейнера через отверстие в своде после завалки на подину лома (рис. 1.3 б). При таком расположении шихты в печи проплавление слоя окатышей происходит медленнее, чем проплавление лома при обычной плавке, что объясняется как различием свойств этих материалов, так и иной схемой протекания процесса.

Плавление лома происходит в основном за счет растворения или плавления кусков в ванне жидкого металла, образующейся на подине после проплавления колодцев. При этом куски лома под действием собственного веса опускаются в жидкий металл.

При нагреве сверху дугой слоя окатышей значительной толщины расплавленный металл заполняет свободное пространство между отдельными окатышами и застывает, не проникая глубоко в слой. Под электродами формируется небольшая ванна жидкого металла. Увеличение ее объема происходит в результате плавления шихты на сравнительно небольшой по площади поверхности раздела между расплавом и твердыми окатышами. Самопроизвольное обрушение окатышей в жидкий металл затрудняется из-за склонности их к спеканию и малой плотности.

Для улучшения условий плавления шихты из губчатого железа или металлизированных окатышей применяют различные технологические приемы, заключающиеся в изменении распределения и порядка загрузки этих материалов в печь (рис. 1.3).

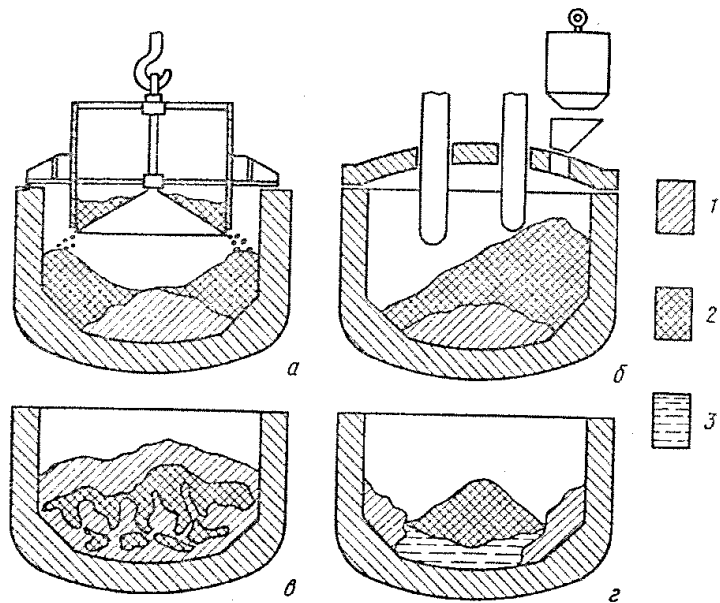


Рис. 1.3. Схема расположения лома и металлизированных окатышей в печи при различных способах периодической загрузки: *а* – периферийная с использованием специальной загрузочной корзины; *б* – через отверстие в своде, *в* – обычной загрузочной корзиной совместно с ломом; *г* – догрузка шихты в расплавленную ванну; 1 – лом; 2 – окатыши; 3 – жидкий металл.

Учитывая отрицательное влияние металлизированного сырья на футеровку печи при выплавке стали с использованием 40% окатышей в печах малой и средней емкости с удельной мощностью трансформатора 350 кВ·А/т для загрузки ранее использовали

корзины специальной конструкции, позволяющие загружать окатыши по периферии печи после загрузки лома. Помимо рассредоточения окатышей, такое расположение составляющих шихты позволяло улучшить условия службы футеровки стен, защищая их от излучения дуг и агрессивного действия шлаков. В дальнейшем от технологии загрузки окатышей по периферии печи отказались. Расплавление окатышей на откосах сильно затягивалось, кроме того, такая технология дополнительно к существующим в цехе завалочным корзинам требовала корзин специальной конструкции (рис. 1.3 а).

Отмечается, что для создания оптимальных условий плавления при совместной загрузке в корзину лома и окатышей следует избегать применения шихты чрезмерно высокой плотности. Если по причине высокого содержания окатышей в шихте или излишне высокой плотности лома трудно избежать образования в шихте толстого слоя окатышей, последние загружаются порциями после проплавления завалки (рис.1.3 з).

Естественно, что такой способ связан с увеличением непроизводительных затрат времени на подвалки шихты и потерями тепла рабочим пространством печи. Важное значение в этом случае имеет степень проплавления шихты перед подвалкой.

Эрозия основных огнеупоров шлаками возрастает со снижением их основности. Количественное выражение величины износа в общем виде дать невозможно, однако для конкретных условий она может быть установлена эмпирически. Помимо основности, износ огнеупоров зависит от ряда других факторов: теплового потока от дуги на футеровку, температуры ванны в период плавления, качества огнеупоров и др. Опыт зарубежных цехов, выплавляющих в основном рядовые малоуглеродистые стали, показывает, что основность шлаков в период плавления металлизированных окатышей обычно поддерживается в пределах 1,5 – 2,0; при этом обеспечивается как дефосфорация металла, так и допустимый износ футеровки откосов.

Изучение службы огнеупоров в дуговых печах показало, что из двух механизмов износа – сколами и оплавлением – последний характерен для высокомошных печей [136]. Оплавление огнеупоров обусловлено снижением температуры плавления рабочего слоя при пропитке его легкоплавкими окислами, а также перегревами футеровки стен из-за повышенной мощности дуг и относительно малого расстояния дуга – стенка. Плавление металлизированных материалов с непрерывной загрузкой сопровождается омыванием или забрызгиванием футеровки кипящим шлаком и воздействием на нее потока газа, несущего мелкие частицы шлака и пыли, что служит причиной оплавления огнеупоров в местах наибольшей тепловой нагрузки. Износ сколами при плавке окатышей, по-видимому, не имеет большого значения, поскольку при сокращении числа или полном исключении подвалок шихты уменьшаются температурные перепады.

Данные об изменении стойкости футеровки свидетельствуют, что она, как правило, при плавке на окатышах несколько ниже, чем при плавке на ломе. Для условий опытно-промышленной выплавки, когда шлаковый и электрический режим плавки не всегда был оптимальным, снижение стойкости по сравнению с обычной практикой достигало иногда 40-80%.

Изучение скорости износа стен методом радиоактивных индикаторов было выполнено в работе [166]. Несмотря на малое число опытов, полученные данные (рис.1.4) хорошо отражают общие закономерности процесса.

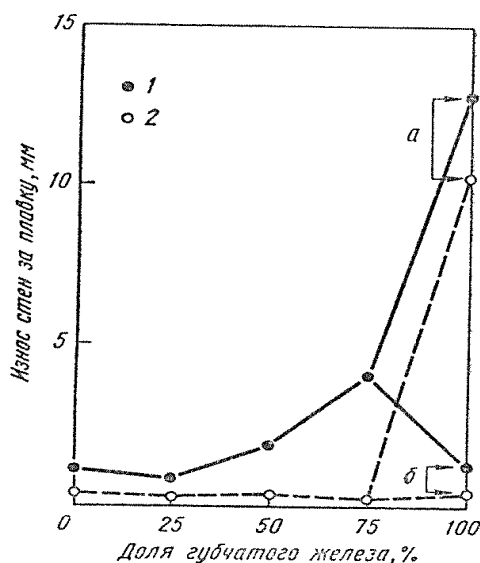


Рис. 1.4. Зависимость износа футеровки от доли губчатого железа в шихте: 1 - суммарный износ; 2 - износ до первой пробы; а – износ при работе на губчатом железе (100%) без жидкой ванны; б – то же, но при загрузке в жидкую ванну.

При шихте, содержащей 25% металлизированных материалов, тепловая нагрузка на стены в период их проплавления получается несколько меньшей, чем в конце периода плавления при 100% лома, за счет частичного экранирования дуги шлаками. Износ в этом случае практически равен износу при плавке лома. При возрастании доли металлизированных материалов до 50 и 75% относительная длительность работы на жидкой ванне и тепловая нагрузка на стены возрастают, что приводит к росту износа. При 100% губки в шихте в случае, когда загрузка велась непрерывно, но жидкая ванна не образовывалась (плавление открытыми дугами на твердой шихте), износ резко возрастал. При работе на жидкой завалке (т.е. когда остается металл от предыдущей плавки) износ наводимым на ранней стадии плавления шлаком ввиду хорошего экранирования дуг был незначительным.

1.4. Выводы по главе 1

В данной главе представлен обзор технологических приемов повышения эффективности производства стали в ДСП, одним из которых является использование металлизированного сырья в шихте. Использование такого сырья привлекательно в первую очередь тем, что качество получаемого в печи полупродукта выше, по сравнению с металлом, полученным при использовании 100% металлического лома. Это обусловлено чистотой металлизированного сырья по вредным примесям. Несмотря на низкое содержание фосфора в ГБЖ, по сравнению с металлическим ломом отсутствуют стандартные приемы ведения процесса дефосфорации при выплавке полупродукта в ДСП.

Проведен обзор работ, связанных с использованием одного из видов металлизированного сырья – ГБЖ при производстве стали в электропечи. Показаны основные преимущества при использовании ГБЖ и проблемы, возникающие в процессе ведения плавки.

Использование добавки ГБЖ в металлошихту определенным образом отражается на технико-экономических показателях плавки. Отмечено, что увеличение добавки ГБЖ определенного состава в завалке приводит к значительному изменению энерготехнологических показателей плавки, таких как расход энергоносителей и шлакообразующих материалов. Причем влияние ГБЖ на показатели плавки в разных электропечах отражается по-разному. Присутствуют и противоречивые взгляды на влияние ГБЖ на показатели плавки и отсутствуют стандартные приемы работы с таким сырьем. Все это зависит от ряда факторов: конструкции ДСП, энерготехнологических режимов плавки, ведения шлакового режима, характеристик ГБЖ, способа загрузки ГБЖ в печь и прочее.

Отмечено снижение стойкости рабочего слоя футеровки печи и увеличение расхода огнеупорных масс при использовании ГБЖ в завалке. Основное количество исследований ранее проводилось при использовании магнезиально-хромитовой футеровки печи при непрерывной загрузке металлизированного сырья. В современной литературе отсутствует в полной мере количество исследований, направленных на изучение влияния ГБЖ определенного состава на технологические показатели плавки и стойкость футеровки ДСП повышенной вместимости, имеющую порционную загрузку шихты и работающей на твердой завалке. Все это обуславливает интерес к проведению дополнительных исследований в этой области.

Важным моментом является способ загрузки металлизированного сырья в печь. Рассмотрены различные технологические приемы, заключающиеся в распределении и

порядка загрузки металлизированных окатышей в электропечи малой и средней емкости с использованием корзин специальной конструкции, позволяющих загружать окатыши по периферии печи после загрузки лома. Такое расположение составляющих шихты позволяло улучшить условия службы футеровки стен, защищая их от излучения дуг и агрессивного действия шлаков. В дальнейшем от технологии загрузки окатышей по периферии печи отказались. Расплавление окатышей на откосах сильно затягивалось, кроме того, такая технология дополнительно к существующим в цехе завалочным корзинам требовала корзин специальной конструкции. Но, в связи с развитием научно-технического прогресса за последние десятилетия (повышение мощности трансформатора, совершенствование конструкций тепловых агрегатов и пр.) рассмотрение таких принципов загрузки ГБЖ на печах повышенной вместимости может быть актуально в настоящее время.

1.5. Постановка задачи исследования

В последнее время на металлургических предприятиях России в качестве металлошихты в электродуговых печах активно используют добавку ГБЖ, что отражается на технико-экономических показателях плавки.

В связи с этим, с целью повышения эффективности производства стали, на примере ДСП-150, работающих на твердой завалке и имеющих порционную загрузку металлошихты, в условиях ЭСПЦ заводов Трубной Металлургической Компании при использовании ГБЖ, производства Лебединского горно-обогатительного комбината 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;
- оценить изменение энерготехнологических показателей плавки и содержание примесей в полупродукте при увеличении доли ГБЖ в шихте;
- 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.

При проведении данных исследований необходимо было оценить возникающие проблемы при использовании ГБЖ в завалке и предложить решения по усовершенствованию режима ведения плавки.

2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Характеристики ДСП-150

Исследования влияния добавки ГБЖ проводились в дуговых сталеплавильных печах вместимостью 150 тонн, работающих на твердой завалке в условиях ЭСПЦ АО “ВТЗ” (ВТЗ) и ПАО “ТАГМЕТ” (ТАГМЕТ). ДСП-150 ТАГМЕТ оборудована источником питания трансформатора – 110 МВА. Для расплавления стали используют графитированные УНР электроды диаметром 610 мм. Номинальная масса выпуска плавки 135 т (“болото” - около 15 т). Количество плавков в сутки - 14-20. Продолжительность цикла плавки – 76 мин. Длительность нахождения металла под током - 49 минут. 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. Схема съемной подины ДСП-150 ТАГМЕТ представлена на рис.2.1.

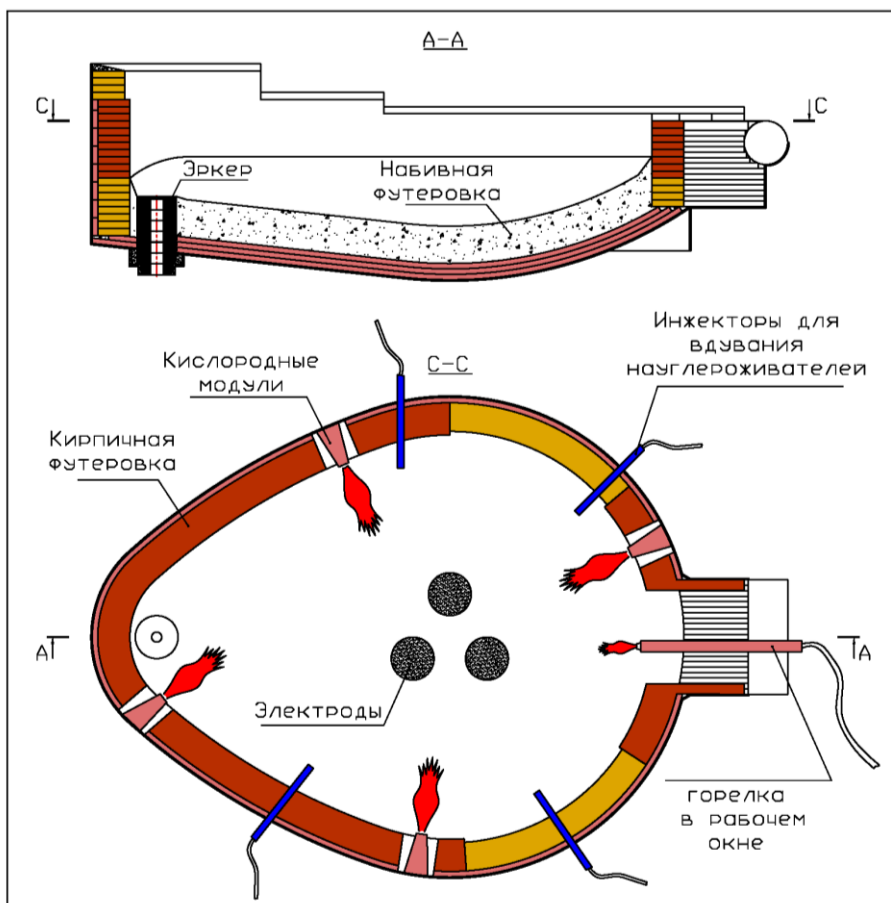


Рис.2.1. Схема подины ДСП-150 ТАГМЕТ.

Установка состоит из съемной подины, стеновых водоохлаждаемых панелей и водоохлаждаемого свода. Внутренний диаметр верхней части кожуха в подине составляет 6900 мм. Кожух печи с внутренней стороны обкладывают двумя слоями футеровки – арматурным и рабочим. Футеровка рабочего слоя выполнена периклазоуглеродистым (ПУ) кирпичом толщиной 400-450 мм. В зонах повышенного износа используют ПУ кирпич, изготовленный из сырья повышенного качества и имеющий увеличенную толщину. Для создания ванны печи используют магнезиальную набивную массу. 3-D модель съемной футерованной подины ДСП-150 представлена на рис.2.2.

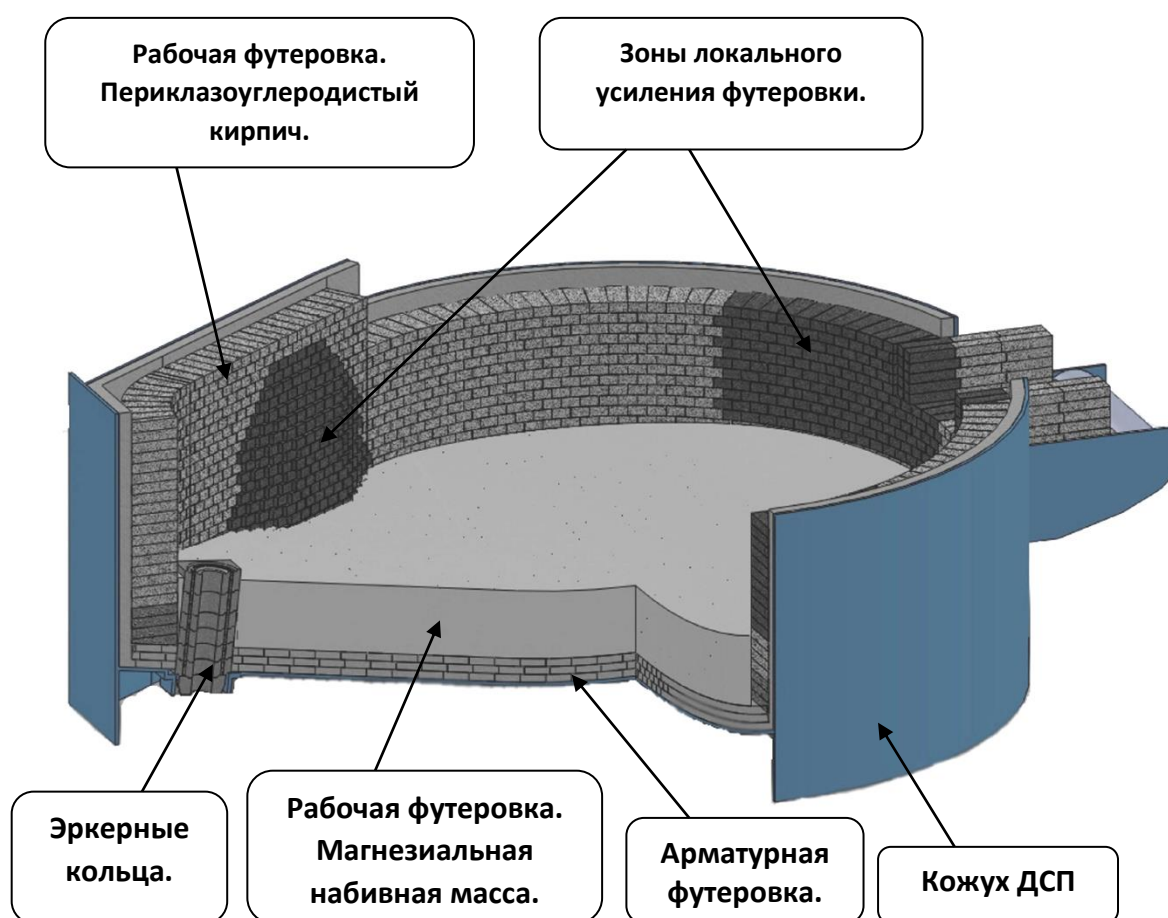


Рис.2.2. 3-D модель съемной футерованной подины ДСП-150.

Внешний вид ПУ футеровки печи после ее монтажа представлен на рис.2.3. На съемную подину установлены водоохлаждаемые панели. Стыки и зазоры между съемной подиной и водоохлаждаемыми панелями заполняют периклазохромитовой массой. В набивной подине установлены эркерные кольца. Набивка подинной массой производится до верхнего уровня эркерных блоков.



а)



б)

Рис.2.3. Состояние футеровки ДСП-150 после монтажа рабочего слоя стен (вид изнутри) и установки водоохлаждаемых панелей: а–вид на эркерную зону, б – вид на рабочее окно.

Внешний вид ДСП-150 ТАГМЕТ представлен на рис.2.4.



Рис.2.4. Внешний вид ДСП-150 ТАГМЕТ.

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

2.2. Требования к производимому полупродукту

В печи производят следующие марки стали: средне- и низкоуглеродистые, низколегированные, среднелегированные, стали повышенной обрабатываемости.

Рекомендованные характеристики полупродукта на выпуске из ДСП следующие: температура металла 1640-1660 °С, содержание углерода в стали 0,07 - 0,10 %, содержание кислорода 500 - 700 ppm. Содержание фосфора в полупродукте обеспечивают технологическим процессом на уровне 0,005-0,008 %.

Дальнейший цикл производства стали включает последующую выпечную обработку металла в сталеразливочном ковше на установке Ковш-Печь, вакуумирование и разливку стали на 5-ти ручьевой машине непрерывного литья заготовок с сечением диаметром от 150 до 400 мм.

2.3. Характеристика применяемого сырья и вспомогательных материалов

Проектные характеристики печи рассчитаны с учетом производства полупродукта в ДСП-150 с использованием 100% скрапа. Для выплавки стали используют

металлический лом различных категорий (3АН-1, 3АЭ, 3А, 3АЖД, стружка стальная - 15А, лом и отходы чугуны - 18А, 3Б11 и др.) и переплавный чугун.

В качестве добавки в металлошихту используют ГБЖ производства ОАО «Лебединский ГОК». ГБЖ представляет собой брикеты, полученные методом прямого восстановления из предварительно окомкованной железной руды и затем спрессованные под давлением. Размер брикета 110*50*30 мм, плотность - 5 г/см³. Степень металлизации ГБЖ составляет 93,1%. Вид брикетов ГБЖ представлен на рис. 2.5.



Рис.2.5. Брикеты ГБЖ.

Типовой химический состав ГБЖ, представлен в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Типовой химический состав ГБЖ, %.

С	S	P	SiO ₂	Fe _{общ}	Fe _{мет.}	Металлизация
1,04	0,006	0,012	4,3	90,6	84,4	93,1

Содержание примесей цветных металлов в ГБЖ (Cu, Ni, Cr и др.) не нормируется при закупке данной металлошихты и в расчетах принимается не более 0,01%. 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%.

Типовой химический состав металлического лома, принимаемый для расчетов, представлен в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Типовой химический состав металлического лома, %.

C	Si	Mn	S	P	As	Cu	Sn	Cr	Ni	Al	Fe
0,3	0,35	0,5	0,025	0,025	0,01	0,25	0,01	0,14	0,15	0,4	ост.

С целью проведения процесса дефосфорации наводят шлак требуемой консистенции и повышают его основность используя добавку извести. Для наведения шлака используют свежесожженную известь I и II сорта с общим содержанием CaO 80-90% (по сертификату 84-85%) и фракцией 10-80 мм.

Для снижения воздействия шлака на периклазоуглеродистую футеровку печи используют добавку MgO-содержащего шлакомодулятора (флюса) с целью насыщения шлака в печи оксидом магния. В качестве MgO-содержащего флюса используют материал марки ФОМИ с фракцией 4-40 мм и химическим составом: MgO > 66%, CaO 12-22%, SiO₂ < 5%, Fe₂O₃ 4-8%.

2.4. Характеристика применяемой футеровки и огнеупорных материалов для ее обслуживания

Для создания арматурной футеровки стен и дна ДСП-150 используют периклазовый кирпич с содержанием MgO в нем не менее 90 %. Толщина арматурного слоя стен составляет 76 мм. На сферическое дно кожуха печи арматурный кирпич укладывают в 3 ряда с общей толщиной 228 мм.

Стены рабочей футеровки печи выкладывают периклазоуглеродистым кирпичом толщиной 400-450 мм, изготовленным из сырьевых материалов разного качества согласно таблице 2.3.

Таблица 2.3. Характеристики ПУ кирпича для создания рабочей футеровки стен ДСП-150.

Зона применения ПУ кирпича	Основные физико-химические показатели ПУ кирпича	Используемые сырьевые материалы для производства ПУ кирпича
Зона металла и шлака, подверженная повышенному износу (зона электродов, зона кислородных фурм)	MgO > 78 %, C = 13-15 %, плотность более 3,04 г/см ³ , открытая пористость менее 4,5 %, ППС > 40 МПа.	Плавленный периклаз и графит повышенного качества, комплексные антиоксиданты
Зона металла и шлака, подверженная пониженному износу (эрозионная зона, зона между кислородными фурмами)	MgO > 78 %, C = 12-14 %, плотность более 3,05 г/см ³ , открытая пористость менее 4,5 %, ППС > 40 МПа.	Плавленный периклаз, графит и добавка антиоксидантов
Нижняя (под набивной массой) и верхняя (свободный борт) части стен, подверженные наименьшему износу	MgO > 85 %, C > 7 %, плотность более 3,10 г/см ³ , открытая пористость менее 5,5 %, ППС > 35 МПа.	Спеченный и плавленный периклаз, графит

Для создания ванны печи и откосов используют магнезиальную набивную массу. Толщина слоя массы в подине составляет 522 мм. Зоны стыка водоохлаждаемых панелей и съемной подины ДСП, а также зазоры в зонах газокислородных фурм заполняют периклазохромитовой массой.

Для проведения горячих ремонтов рабочей футеровки печи используют подварочную магнезиальную массу для поддержания формы откосов и подины печи и торкрет-массу для создания защитного торкрет-слоя на кирпичной футеровке стен ДСП.

Подварку (заправку) подины и откосов печи производят после выпуска плавки с использованием специальной установки, которую опускают в пространство ДСП при помощи крана (рис. 2.6).

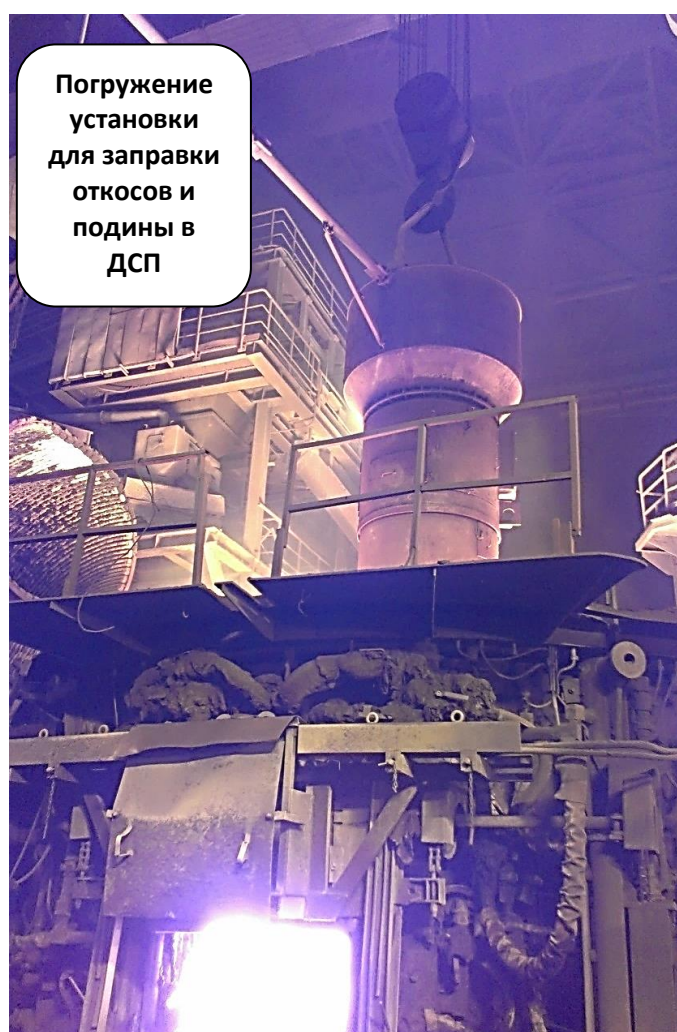


Рис. 2.6. Погружение установки для заправки откосов и подины в ДСП-150.

Основные физико-химические показатели применяемых огнеупорных масс для создания футеровки печи и ее ремонта представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4. Физико-химические показатели огнеупорных масс ДСП-150.

Описание и зона применения огнеупорной массы	Основные физико-химические показатели массы
Набивная магнезиальная масса для создания подины и откосов печи при холодном ремонте	$\text{MgO} > 82\%$, $\text{CaO} = 7-12\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 4-6\%$, насыпная плотность более $2,3 \text{ г/см}^3$, зерновой состав 0-6 мм.
Периклазохромитовая масса для заполнения зазоров в зонах стыка водоохлаждаемых панелей и съемной подины ДСП, а также в зонах газокислородных фурм при холодном ремонте	$\text{MgO} > 46\%$, $\text{Cr}_2\text{O}_3 < 20\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 18\%$, $\text{CaO} < 3,5\%$ насыпная плотность более $2,4 \text{ г/см}^3$, зерновой состав 0-5 мм.
Подварочная (заправочная) магнезиальная масса для подины и откосов при проведении горячих ремонтов	$\text{MgO} > 79\%$, $\text{CaO} = 6-11\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 5-9\%$, насыпная плотность около $2,5 \text{ г/см}^3$, зерновой состав 0-4 мм.
Торкрет-массы для футеровки ПУ стен при горячем ремонте	$\text{MgO} = 65-90\%$, $\text{CaO} = 0-24\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,4-5,0\%$, зерновой состав 0-4 мм.

Заправочная магнезиальная масса подается под давлением через трубу на изношенные участки откосов и подины печи (см. рис. 2.7).



Рис. 2.7. Подварка (заправка) откосов и подины ДСП-150 после выпуска плавки (вид через рабочее окно).

Торкретирование стен футеровки производят через рабочее окно ДСП при помощи манипулятора для торкретирования типа Pirogun, который состоит из установки высокого давления и манипулятора. Торкрет-масса, смешанная с водой, подается под давлением на стены футеровки печи, образуя на них защитный огнеупорный торкрет-слой (см.рис.2.8.).

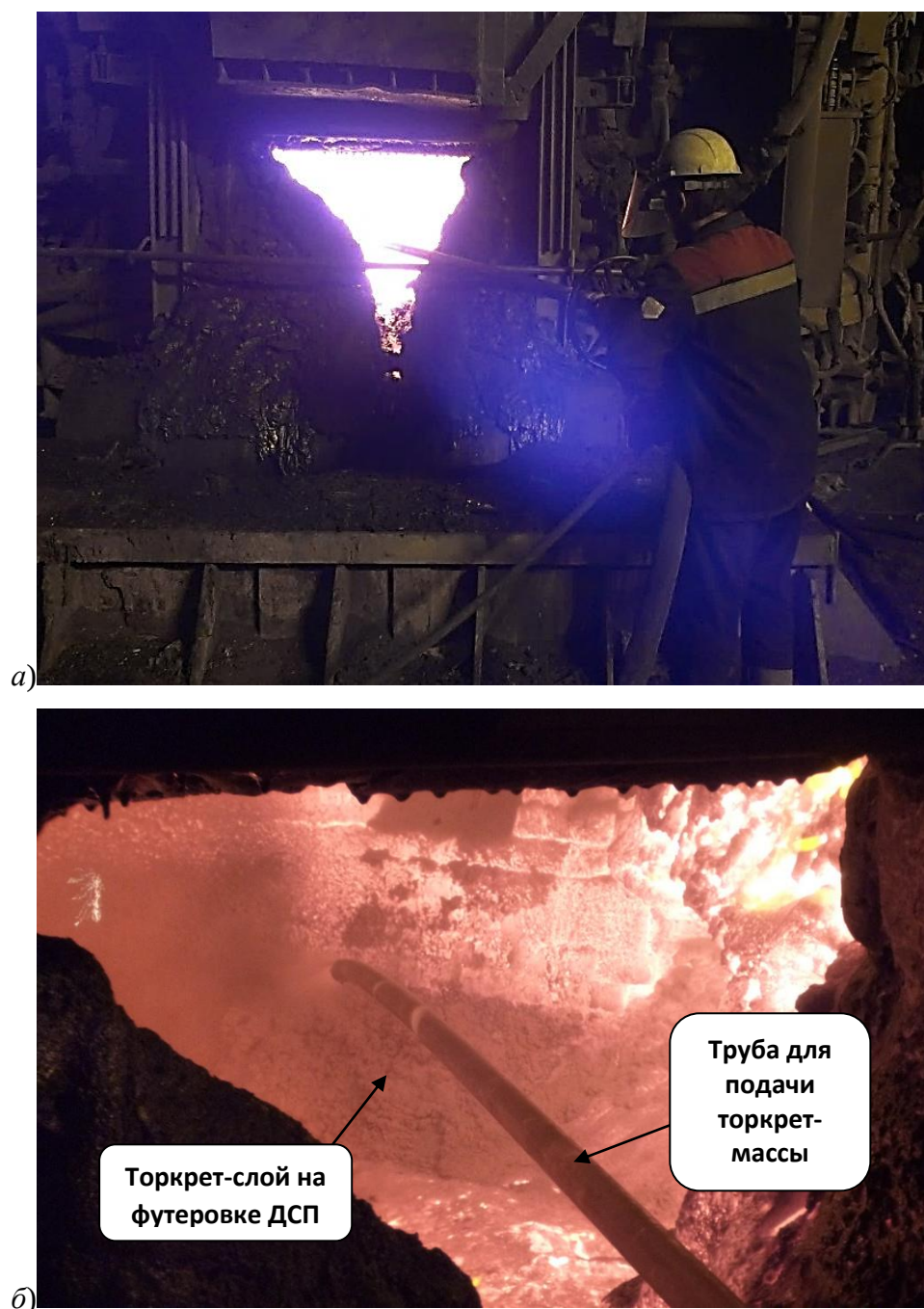


Рис. 2.8. Торкретирование стен ДСП-150 после выпуска плавки.

2.5. Исследуемые технологические схемы выплавки стали с использованием ГБЖ

Загрузку металлошихты в печь осуществляют с помощью завалочных бадей. При производстве плавки осуществляют одну завалку шихты и две подвалки. ГБЖ загружают при помощи коробов в 1-ю завалочную бадью послойно совместно с ломом. Общее количество металлошихты в завалке составляло около 155 т. Максимальное количество ГБЖ на плавку составляло 50 т. Долю ГБЖ на плавку определяли в зависимости от

требуемого содержания меди в полупродукте. Типовое распределение металлошихты в загрузочные бадьи в зависимости от требуемого содержания меди в полупродукте производили согласно таблице 2.5.

Таблица 2.5. Распределение металлошихты в загрузочные бадьи.

Номер бадьи	Тип металлошихты	Количество
ЗАВАЛКА (90 тонн)		
Бадья 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)		
Бадья 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)		
Бадья 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 бадьи загружают известь и антрацит.

Плавку ведут согласно плановому энерготехнологическому режиму. Перед началом плавки в ДСП засыпают антрацит, в количестве 1 т. В первую бадью загружают 90 т металлошихты из них от 35 до 50 т ГБЖ, в зависимости от регламентированного содержания меди в полупродукте и 2 т извести. С увеличением доли ГБЖ увеличивается насыпная плотность завалки. Через 17 минут после завалки первой бадьи и ввода в печь 16,9 МВт·ч электрической энергии осуществляют первую подвалку металлошихты весом 40 т и 2 т извести. Во время плавления первой подвалки образуется шлак. Через 6 минут после первой подвалки осуществляют вдувание углеродсодержащего материала с интенсивностью 30-60 кг/мин. После ввода 28,3 МВт·ч электроэнергии производят вторую подвалку 25 т металлошихты и 2 т извести. Далее в процессе плавления второй

подвалки отдают 250 кг MgO-содержащего флюса. В период окислительного рафинирования осуществляют вдувание углеродсодержащего материала с интенсивностью 30-60 кг/мин, производят спуск шлака в чашу. В конце окислительного периода производят замер температуры стали и отбор пробы металла и шлака.

Типовой плановый энерготехнологический режим плавения металлошихты, состоящей из металлического лома и ГБЖ, в зависимости от вводимой электрической энергии представлен в таблице 2.6.

Таблица 2.6. Энерготехнологический режим выплавки полупродукта в ДСП-150.

Вводимая эл.энергия, МВт·ч	Степень трансформатора (длина дуги)	Добавка материалов, кг	Операции
ЗАВАЛКА			
0 – 0,5	12 (2)	Антрацит – 1000 кг, Известь – 2000 кг.	
0,5 – 16,9	18 (3)		
ПОДВАЛКА 1			
16,9 – 17,4	12 (2)	Известь – 2000 кг.	Появление шлака, вдувание УСМ (30-60 кг/мин)
17,4 – 28,3	18 (3)		
ПОДВАЛКА 2			
28,3 – 28,8	12 (2)	Известь – 2000 кг, MgO-содержащий флюс – 250 кг.	
28,8 – 41,8	18 (3)		
ДОВОДКА (окислительный период)			
41,8 - Выпуск	14 (2)	Известь – 500 кг, MgO-содержащий флюс – 750 кг.	Вдувание УСМ (30-60 кг/мин), спуск шлака, замер температуры, отбор пробы металла и шлака
ВЫПУСК МЕТАЛЛА, ОБРАБОТКА ЭРКЕРА			

Работу газокислородных горелок осуществляют в автоматическом режиме в зависимости от введенной электрической энергии по периодам плавки. Фактические энерготехнологические режимы плавок варьируются и могут отличаться от представленного планового режима.

Замер температуры металла осуществляют с помощью установки “More” (рис.2.9) с использованием термопары марки ТС360309 Р1170 NР. Содержание кислорода в металле определяют при помощи погружаемого зонда.

Отбор пробы металла производят зондом с пробоотборником типа BSETEAP420, формирующего пробу в виде таблетки. Далее пробу охлаждают и отправляют в лабораторию для проведения химического анализа с использованием эмиссионного спектрометра.



Рис.2.9. Отбор пробы металла и шлака из ДСП-150.

Одновременно с отбором пробы металла производят отбор пробы шлака. В процессе отбора пробы металла на держателе пробоотборника образуется шлаковый налет (брызги шлака), который используют в качестве пробы шлака. Анализ шлака проводят с использованием рентгенофлуоресцентного метода.

Достоверность результатов определения температуры и химического анализа шлака и металла обеспечивает применение современных методов анализа и оборудования.

Исследование влияния добавки ГБЖ на технологические показатели плавки и стойкость футеровки ДСП-150 проводили совместно с технологическим персоналом предприятия. При этом 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;
- 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;

- контроль проведения топографии износа при демонтаже футеровки.

Фиксирование остаточной толщины рабочего слоя футеровки проводили при помощи замеров при последовательном демонтаже рядов футеровки. Снятие топографии износа проводили в следующих зонах: эркерной зоне, зона газокислородных фурм и электродов, зона рабочего окна ДСП, отдельные зоны с повышенным износом рабочего слоя футеровки.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВКИ ГБЖ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПЛАВКИ В ДСП-150

3.1. Влияние добавки ГБЖ на технологические показатели плавки

Влияние добавки металлизированного сырья, в том числе ГБЖ, на энерготехнологические показатели плавки проявляется по-разному [51, 61, 62, 63, 64, 122, 130, 131, 132, 159, 172, 173, 174, 180, 192] и зависит от разных факторов – способа загрузки ГБЖ в печь, конструкции печи, ведения энерготехнологического режима, физико-химических характеристик ГБЖ и других.

Для анализа влияния доли ГБЖ в шихте на энерготехнологические показатели плавки использовали массив, состоящий из 201 плавки, отобранный случайным образом из текущего производимого сортамента в условиях ЭСПЦ ВТЗ при выплавке стали в ДСП-150, работающей на твердой завалке и использующей порционную загрузку шихты. Построены диаграммы, показывающие влияние доли ГБЖ на технологические показатели плавки, которые представлены на рисунках ниже. На диаграммах представлены уравнения аппроксимирующих кривых. Для построения зависимостей использовали программный пакет STATISTICA и Microsoft Excel. На графиках показан коэффициент корреляции, уровень значимости, а также интервалы с доверительной вероятностью 95%.

На рис. 3.1 представлен график, показывающий изменение выхода годного при изменении доли ГБЖ в завалке.

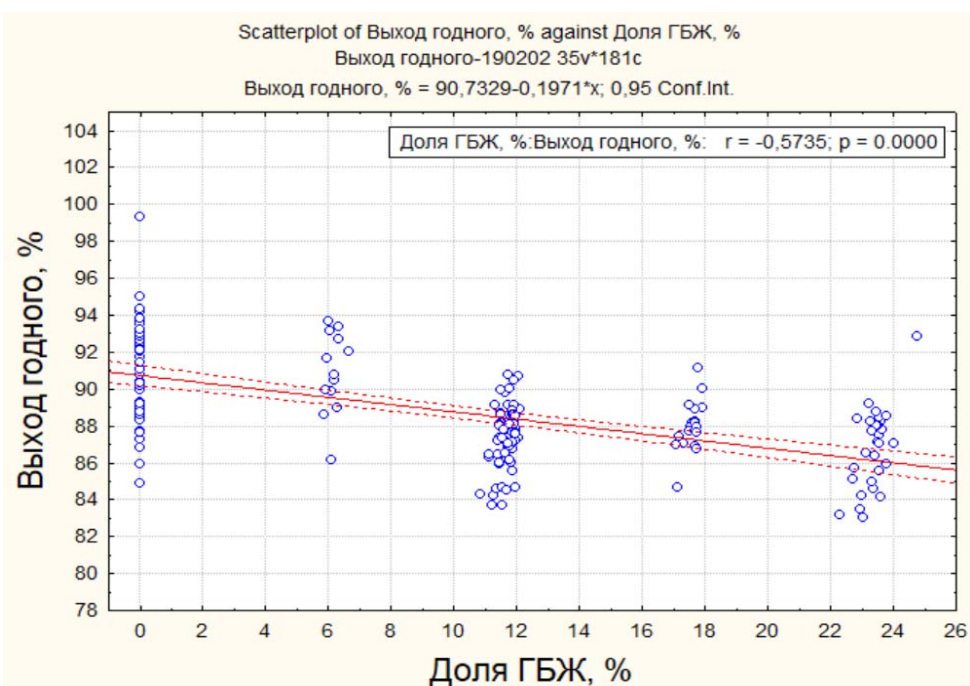


Рис. 3.1. Выход годного шихты в зависимости от доли ГБЖ.

Выход годного рассчитывали по формуле:

$$ВГ = M_{ж.м.} / M_{ш.} * 100\%, \quad (3.1)$$

где $M_{ж.м.}$ – масса плавки, т;

$M_{ш.}$ – масса завалки, т.

Из графика на рис. 3.1 видно, что при увеличении добавки ГБЖ в шихту с 0 до 25% наблюдается снижение выхода годного в среднем с 91% до 86%, что обусловлено содержанием значительного количества пустой породы в ГБЖ, а также потерями железа со скачиваемым шлаком. При этом на рис. 3.2 видно, что при увеличении доли ГБЖ в шихте повышается количество шлака в печи.

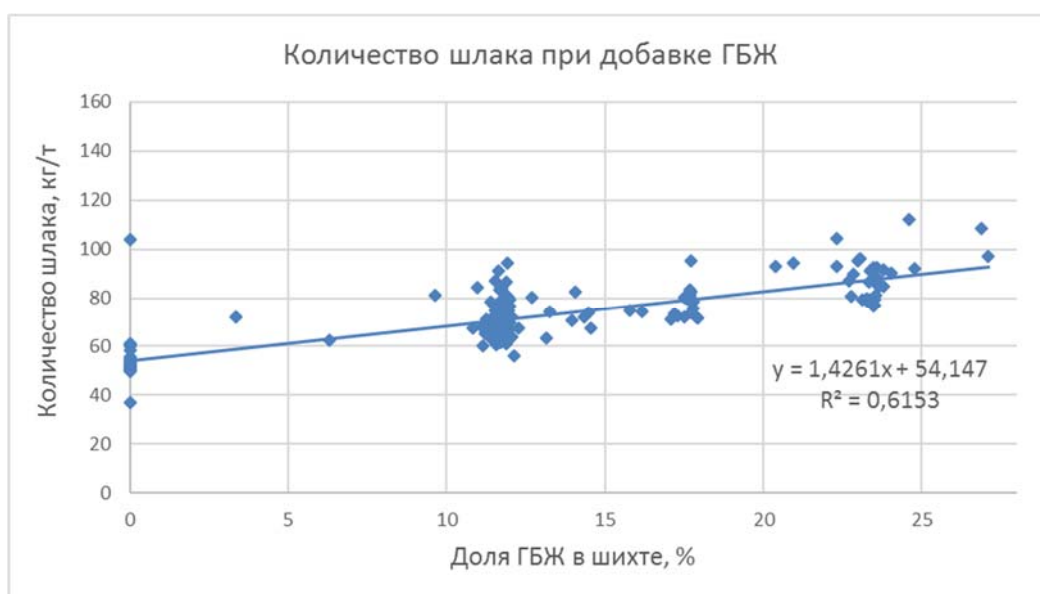


Рис. 3.2. Количество шлака при увеличении доли ГБЖ в шихте.

При увеличении доли ГБЖ с 0 до 25 % количество шлака в печи увеличивается с 53 до 90 кг/т, что отражается на расходе электроэнергии. В связи с этим был проведен анализ влияния доли ГБЖ в завалке, а также других показателей на удельный расход электрической энергии. При этом также провели теоретический расчет электрической энергии, необходимой для расплавления металлошихты.

Расчет электрической энергии проводили следующим образом. Количество электрической энергии на производство 1 т жидкого полупродукта включает электроэнергию, необходимую для расплавления металлошихты (металлического лома и ГБЖ) и перегрева ее до температуры 1570 °С, энергию для расплавления добавляемой извести и MgO-флюса, а также энергию, необходимую для перегрева расплавленного металла и шлака от температуры 1570 °С до температуры выпуска:

$$W_{\text{расч}} = (M_{\text{ЛОМ}} * \Delta H_{\text{ЛОМ}}(0-1570) + M_{\text{ГБЖ}} * \Delta H_{\text{ГБЖ}}(0-1570) + M_{\text{ИЗВ}} * C_{\text{ИЗВ}} * \Delta T_{\text{ИЗВ}}(0-1570) + \\ + M_{\text{Флюс}} * C_{\text{Флюс}} * \Delta T_{\text{Флюс}}(0-1570) + M_{\text{Ме}} * C_{\text{Ме}} * \Delta T_{(1570-T_{\text{К}})} + M_{\text{Шл}} * (C_{\text{Шл}} * \Delta T_{(1570-T_{\text{К}})} + \\ + q_{\text{шл}})) / M_{\text{Ме}} * X_{\text{эл}} \quad (3.2)$$

где $M_{\text{ЛОМ}}$, $M_{\text{ГБЖ}}$, $M_{\text{ИЗВ}}$, $M_{\text{Флюс}}$, $M_{\text{Ме}}$, $M_{\text{Шл}}$ – массы лома в завалке, ГБЖ в завалке, извести, MgO-флюса, вес плавки и шлака, т;

$\Delta H_{\text{ЛОМ}}(0-1570)$, $\Delta H_{\text{ГБЖ}}(0-1570)$ – энергетические потребности процесса плавления лома и ГБЖ до температуры 1570°C. В расчете согласно данным [136] для лома и металлизированных материалов принимаем $\Delta H_{\text{ЛОМ}}(0-1570) = 388$ кВт·ч/т, $\Delta H_{\text{ГБЖ}}(0-1570) = 490$ кВт·ч/т;

$C_{\text{Ме}} = 0,2325$; $C_{\text{Шл}} = 0,3472$ – теплоемкости жидкого металла и шлака, кВт·ч/(т·K);

$C_{\text{ИЗВ}} = C_{\text{Флюс}} = 0,233$ – теплоемкости извести и MgO-флюса, кВт·ч/(т·K);

$\Delta T_{\text{ИЗВ}}(0-1570)$, $\Delta T_{\text{Флюс}}(0-1570)$ – изменение температуры извести и MgO-флюса при нагреве до 1570°C;

$\Delta T_{(1570-T_{\text{К}})}$ – изменение температуры жидкого расплава с 1570°C до температуры выпуска полупродукта $T_{\text{К}}$;

$q_{\text{шл}} = 58,1949$ кВт·ч/т – скрытая теплота плавления шлака;

$X_{\text{эл}} = 0,8$ – доля электрической энергии из общей энергии.

На рис. 3.3 представлен фактический удельный расход электроэнергии и расчетный, с использованием уравнения (3.2) в зависимости от доли ГБЖ на примере массива, состоящего из 201 плавки, показаны аппроксимирующие линии тренда.

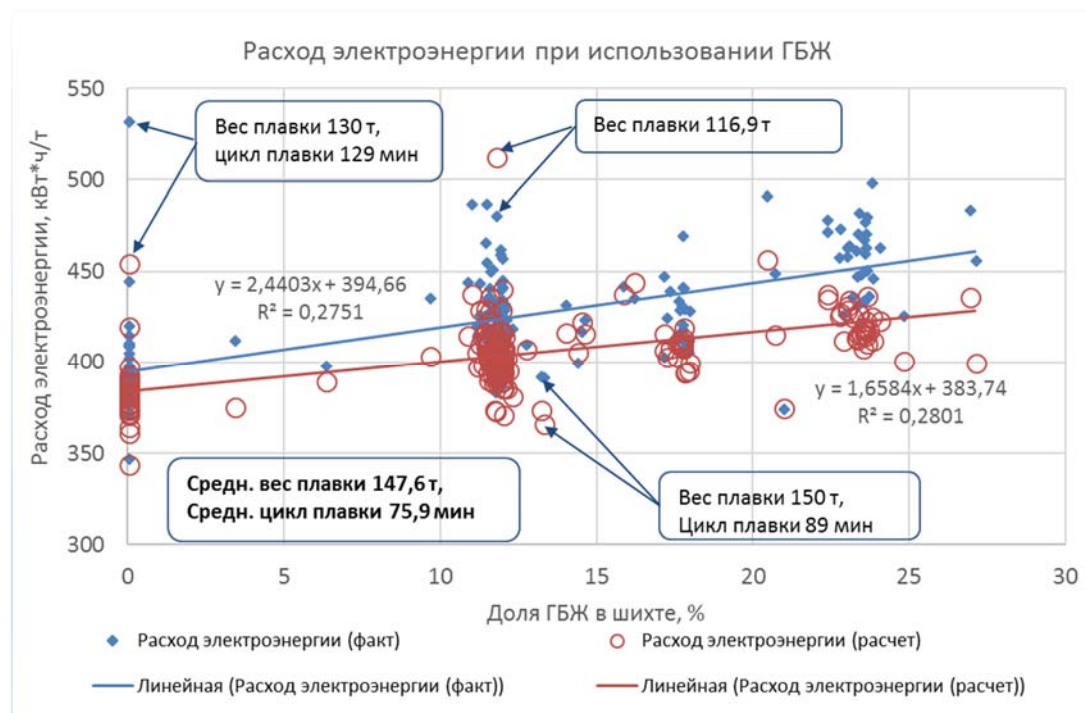


Рис. 3.3. Удельный расход электроэнергии в зависимости от доли ГБЖ в шихте.

Увеличение расхода электрической энергии (рис.3.3) при повышении доли ГБЖ связано с наличием оксидов железа в ГБЖ, на восстановление которых необходимы дополнительные энергетические затраты и повышенным количеством образующегося шлака. Наличие пустой породы в ГБЖ снижает коэффициент теплопроводности шихты, что также отражается на расходе электрической энергии. При увеличении доли ГБЖ в шихте с 0 до 27 %, средний фактический удельный расход электроэнергии повышается с 400 до 465 кВт·ч/т. Характер фактического расхода электроэнергии сопоставим с расчетным, при расчете которого не были учтены потери. Разброс показателей обусловлен, в первую очередь различными нештатными ситуациями, связанными, например, с задержками выпуска плавки и необходимостью дополнительного ввода тепла для теплосодержания металла, с малым количеством выпускаемого металла и пр. Анализ некоторых плавков, имеющих отклонения технологических параметров от средних значений, представлен на рисунке.

На рис. 3.4 показано изменение удельного расхода электроэнергии в зависимости от расчетного количества шлака в печи, которое рассчитывали с учетом прихода оксидов (CaO, MgO) из шлакообразующих добавок, прихода оксида кремния из ГБЖ, а также с учетом фактического содержания оксидов железа, марганца и алюминия в шлаке (массив из 201 плавки с использованием ГБЖ). При увеличении количества шлака с 75 до 155 кг/т средний расход электроэнергии повышается с 400 до 450 кВт·ч/т.

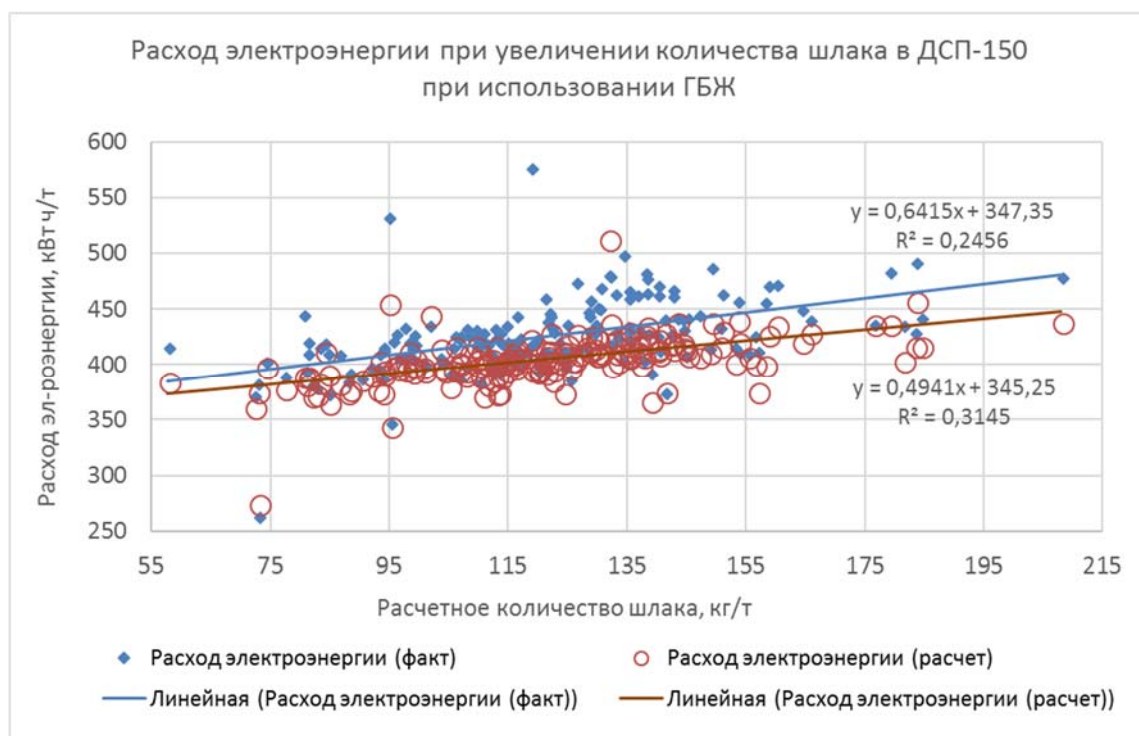


Рис. 3.4. Удельный расход электроэнергии в зависимости от количества шлака в ДСП-150 при использовании ГБЖ в шихте.

Из представленных данных видно, что увеличение электроэнергии при использовании ГБЖ в шихте обусловлено повышенным количеством образующегося шлака, вызванное, в первую очередь, поступлением SiO_2 из ГБЖ и добавляемой известью для поддержания заданной основности шлака.

На рис. 3.5 показан удельный расход электроэнергии в зависимости от количества добавляемой извести.

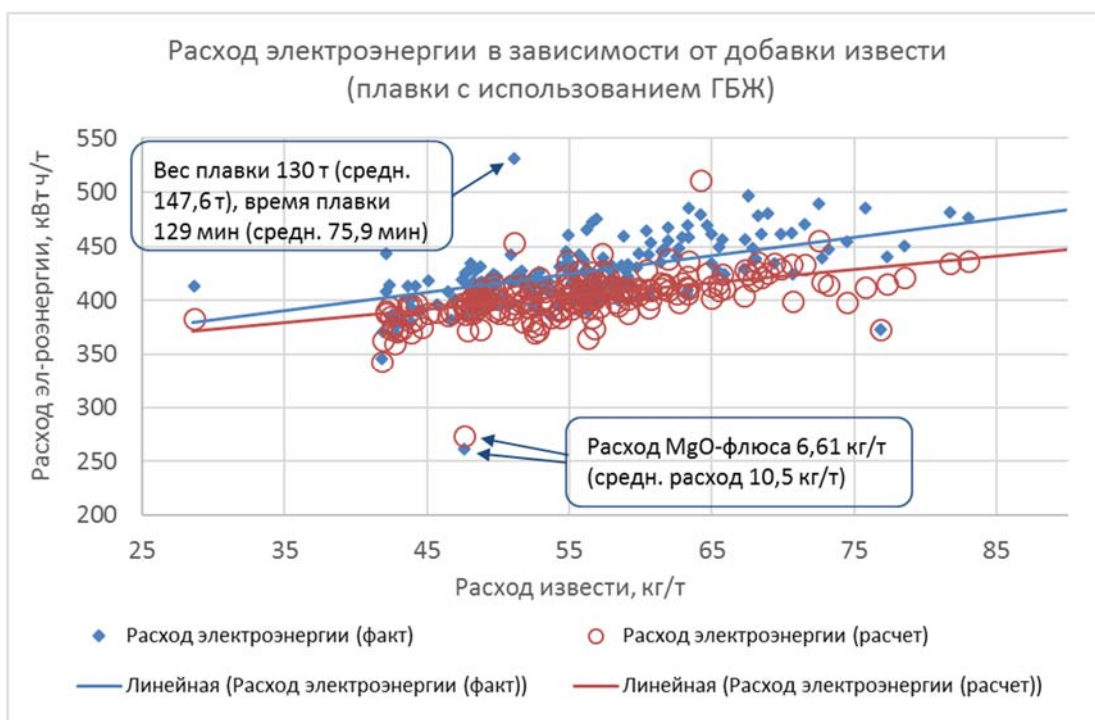


Рис. 3.5. Удельный расход электроэнергии в зависимости от расхода извести в ДСП-150 при использовании ГБЖ в шихте.

При увеличении расхода извести с 45 до 75 кг/т (увеличение примерно на 4,4 т на плавку) удельный расход электроэнергии возрастает с 405 до 455 кВт·ч/т (на 12,3 %), что существенно отражается на экономических затратах.

Изменение содержания оксида железа в шлаке влияет на его вязкость и жидкоподвижность. Это приводит к колебанию уровня его вспенивания в печи и нестабильному расходу электроэнергии. При оценке влияния содержания оксида железа в шлаке на удельный расход электроэнергии зависимости не обнаружено (рис. 3.6).



Рис. 3.6. Удельный расход электроэнергии в зависимости от содержания FeO в шлаке.

Учитывая влияние химического состава и температуры электропечного шлака на его вспенивание и воздействие на рабочую футеровку была проведена теоретическая оценка высоты вспенивания шлака в зависимости от доли ГБЖ в металлошихте.

Для оценки высоты вспенивания шлака было использовано следующее регрессионное уравнение, полученное в результате обработки экспериментальных данных при выплавке полупродукта в ДСП-150 [57], характеризующее способность шлаков пениться, в зависимости от физико-химических свойств шлака:

$$H_{\text{шл}} = 4291,95 - 2,1 * (\text{SiO}_2) + 7,94 * (\text{CaO}) - 46,04 * (\text{MgO}) - 9,48 * (\text{Fe}_{\text{общ}}) - 1,97 * T_{\text{шл}} \quad (R=0,95) \quad (3.3)$$

Приняв для анализируемого массива плавок, что $T_{\text{шл}} = T_{\text{ме}}$ получим следующие показатели высоты вспенивания шлака от доли ГБЖ в шихте (рис. 3.7):

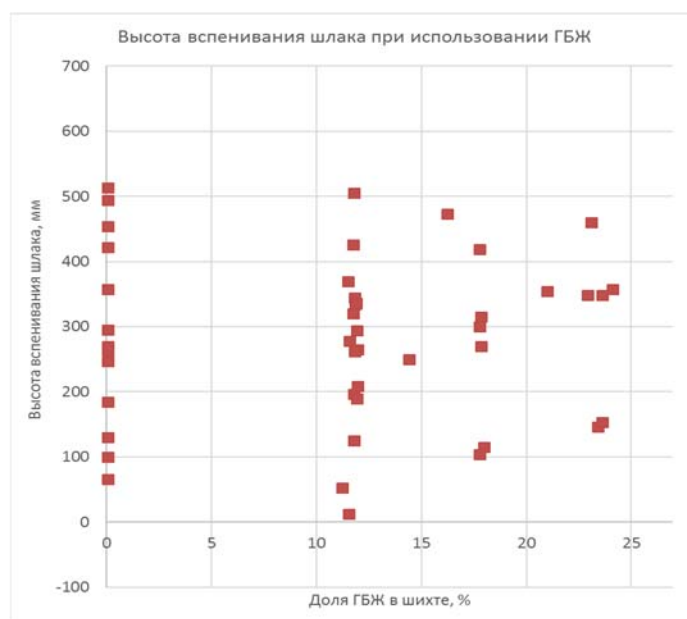


Рис. 3.7. Оценка высоты вспенивания шлака при использовании ГБЖ в шихте.

При расчете высоты вспенивания шлака анализируемый массив ограничили по содержанию оксидов: FeO в шлаке менее 27 %, CaO 30-57%, MgO менее 12 %, что удовлетворяет пределам содержаний данных оксидов, которые использовали при получении используемого регрессионного уравнения (3.3).

Из представленных на рис. 3.7 данных видно, что высота вспенивания шлака при использовании ГБЖ в шихте колеблется в довольно широких пределах, что говорит о том, что режим поддержания вспененного шлака в ДСП был не стабильный и это отражалось на состоянии футеровки печи.

Также была построена зависимость высоты вспенивания шлака от содержания в нем оксидов железа (рис. 3.8), откуда видно, что зависимость между содержанием FeO в шлаке и высотой его вспенивания отсутствует, но можно наблюдать тенденцию снижения высоты вспенивания шлака при увеличении его окисленности.

Вспененный шлак уменьшает воздействие электрической дуги на футеровку ДСП и увеличивает КПД нагрева ванны металла и способствует увеличению стойкости печи. Для поддержания шлака во вспененном состоянии возникает потребность в увеличении расхода углеродсодержащих материалов, вдуваемых в печь.

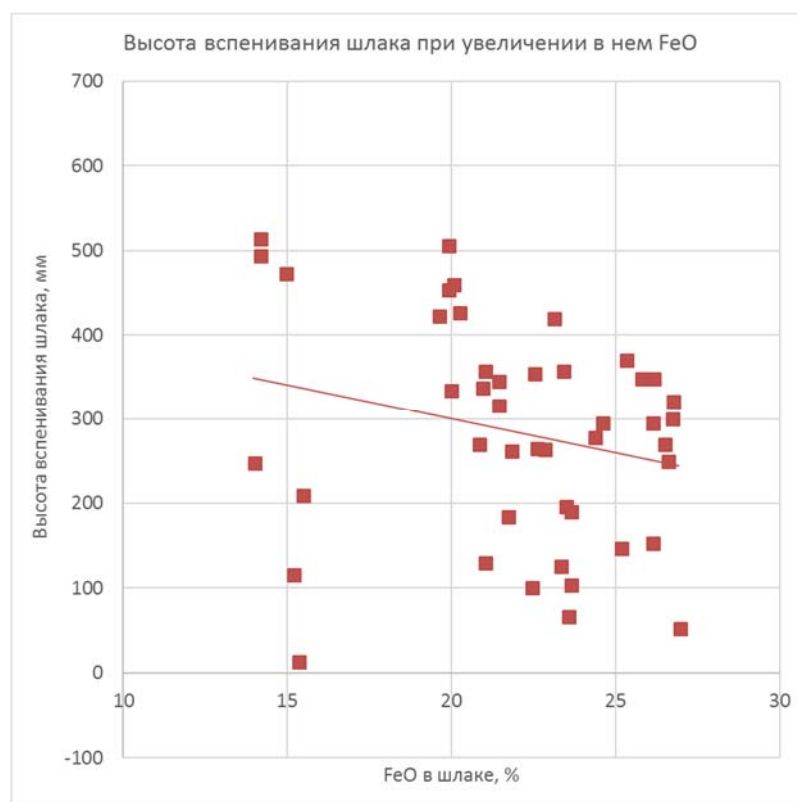


Рис. 3.8. Оценка высоты вспенивания шлака в зависимости от содержания FeO.

Долю химической энергии при увеличении добавки ГБЖ увеличивали пропорционально доле электрической энергии согласно заданному технологическому режиму. Фактический удельный расход кислорода при увеличении доли ГБЖ представлен на рис. 3.9.

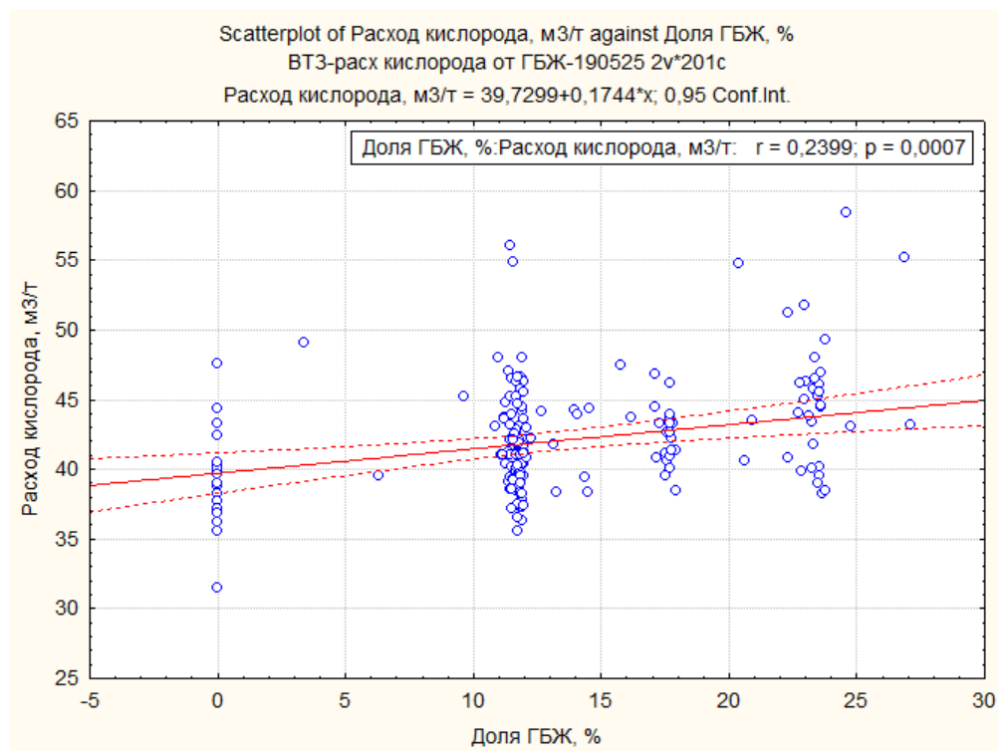


Рис. 3.9. Удельный расход кислорода в зависимости от доли ГБЖ в шихте.

Наличие оксида кремния (около 4,3%) в ГБЖ снижает основность шлака и делает его более жидкоподвижным, а также отрицательно влияет на процесс дефосфорации и износ рабочей футеровки, в связи с чем возникает необходимость добавки дополнительного количества извести для повышения основности шлака. Но с другой стороны, чистота ГБЖ по содержанию серы и фосфора позволяет вести процесс дефосфорации в печи без повышения расхода извести. Для поддержания шлака определенной консистенции количество отдаваемых шлакообразующих определял сталевар. Удельные расходы извести и MgO-содержащего флюса в зависимости от доли ГБЖ в шихте показаны на рис. 3.10 и 3.11. При повышении доли ГБЖ расход извести и MgO-содержащего флюса увеличивали. MgO-содержащий флюс отдавали в печь для насыщения шлака оксидом магния с целью снижения скорости износа магнезиальной футеровки ДСП. В качестве MgO-содержащего флюса использовали магнезиально-известковый флюс (ФОМИ) с содержанием MgO около 69,5%.



Рис. 3.10. Удельный расход извести в зависимости от доли ГБЖ в шихте.

Из рисунка 3.10 видно, что расход извести при увеличении доли ГБЖ с 0 до 27 % повышали в среднем с 47 до 70 кг/т, расход MgO-содержащего флюса повышали в среднем с 9 до 11,5 кг/т (рис. 3.11). Колебания расходов извести и флюса связаны с нестабильным состоянием шлака и необходимостью поддержания его определенной консистенции.

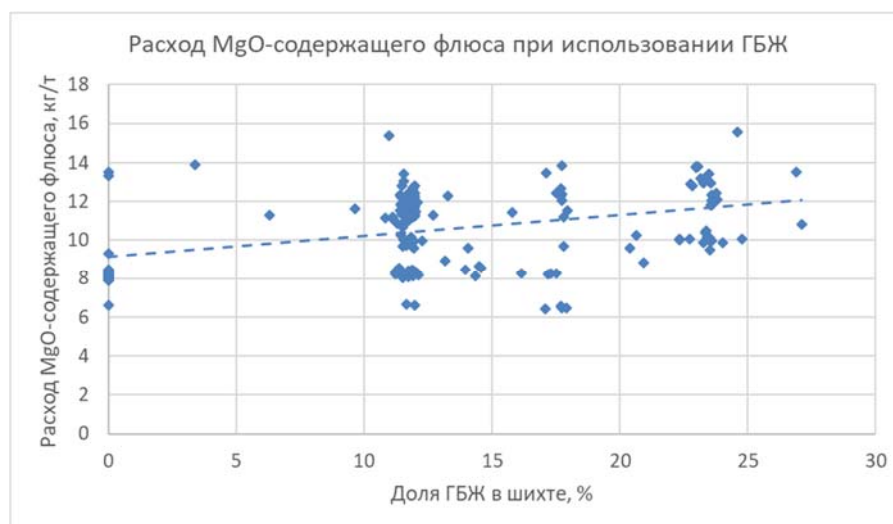


Рис. 3.11. Удельный расход MgO-содержащего флюса в зависимости от доли ГБЖ в шихте.

В условиях ЭСПЦ ТАГМЕТ при выплавке стали в ДСП-150 также был проведен анализ влияния доли ГБЖ в шихте на технологические показатели плавки. Данные представлены на рисунках ниже. Для анализа использовали массив, состоящий из 107 плавок, отобранный случайным образом из производимого сортамента.

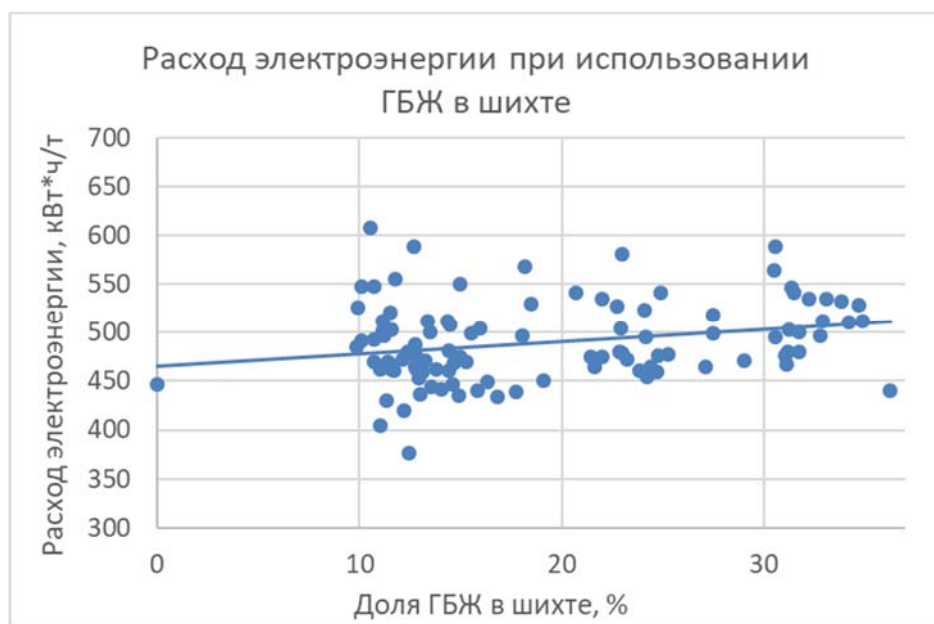


Рис. 3.12. Удельный расход электроэнергии в зависимости от доли ГБЖ в шихте.

При повышении доли ГБЖ в шихте с 0 до 36% наблюдается тенденция увеличения среднего удельного расхода электроэнергии с 475 до 520 кВт·ч/т (рис. 3.12).

На рис. 3.13 показан удельный расход электроэнергии в зависимости от расчетного удельного количества шлака в ДСП-150. Расчет удельного количества шлака учитывает оксиды, вносимые шлакообразующими добавками, SiO_2 , переходящее из ГБЖ, а также фактическое содержание оксида железа, марганца и алюминия в шлаке. Видно, что удельный расход электроэнергии растет при повышении количества шлака в печи.

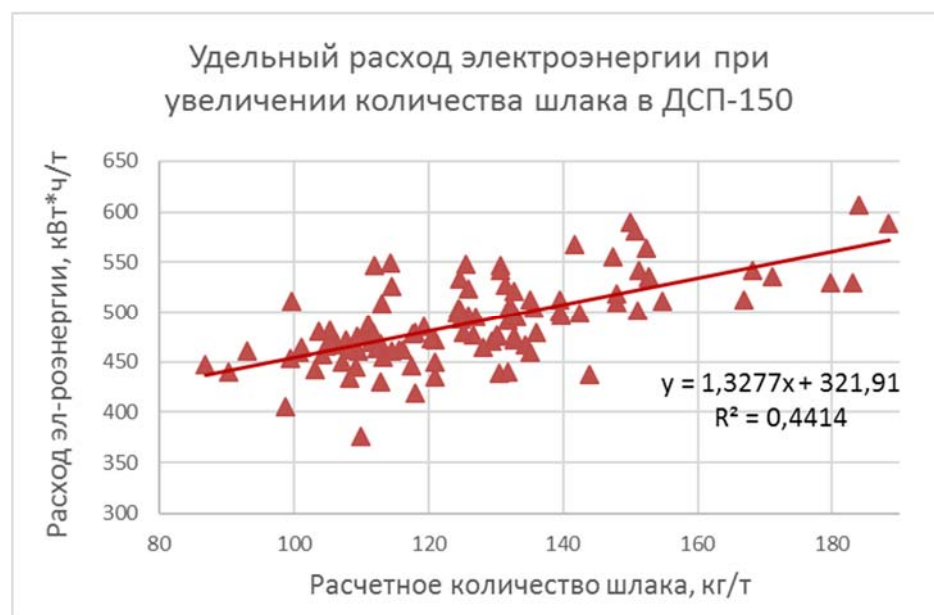


Рис. 3.13. Удельный расход электроэнергии в зависимости от расчетного количества шлака в ДСП-150.

При увеличении количества шлака со 100 до 160 кг/т расход электроэнергии повышается с 450 до 530 кВт·ч/т.

Следует отметить, что зависимости между содержанием FeO в шлаке и удельным расходом электроэнергии не отмечено (рис. 3.14). Соответственно, рост электроэнергии связан в первую очередь с повышенным количеством образующегося шлака.

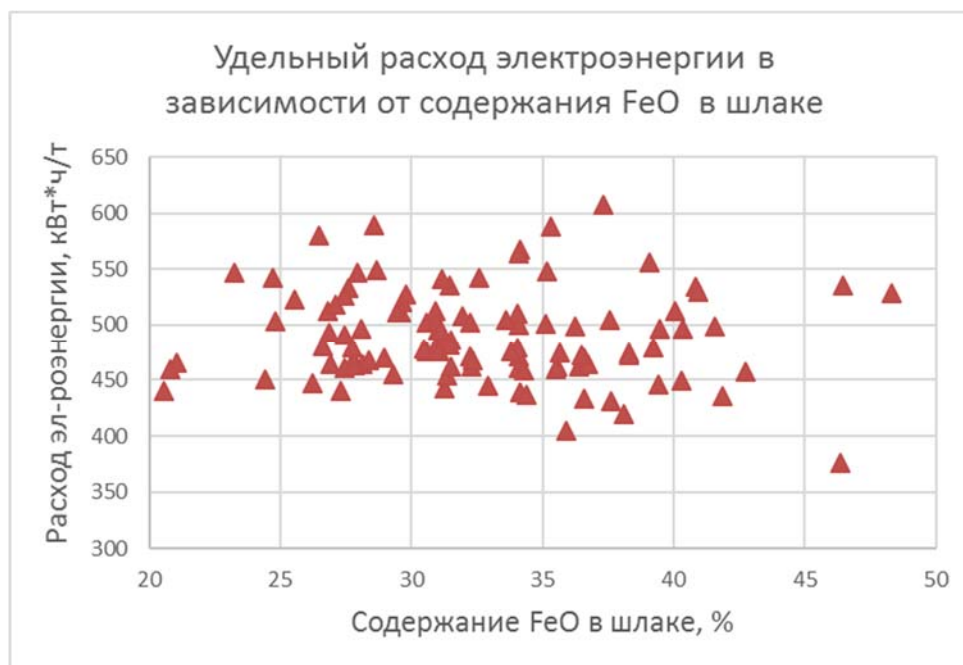


Рис. 3.14. Удельный расход электроэнергии в зависимости от содержания FeO в шлаке.

Удельный расход кислорода и газа при увеличении доли ГБЖ увеличивали согласно заданному энерготехнологическому режиму. Фактические показатели представлены на рис. 3.15 и 3.16.

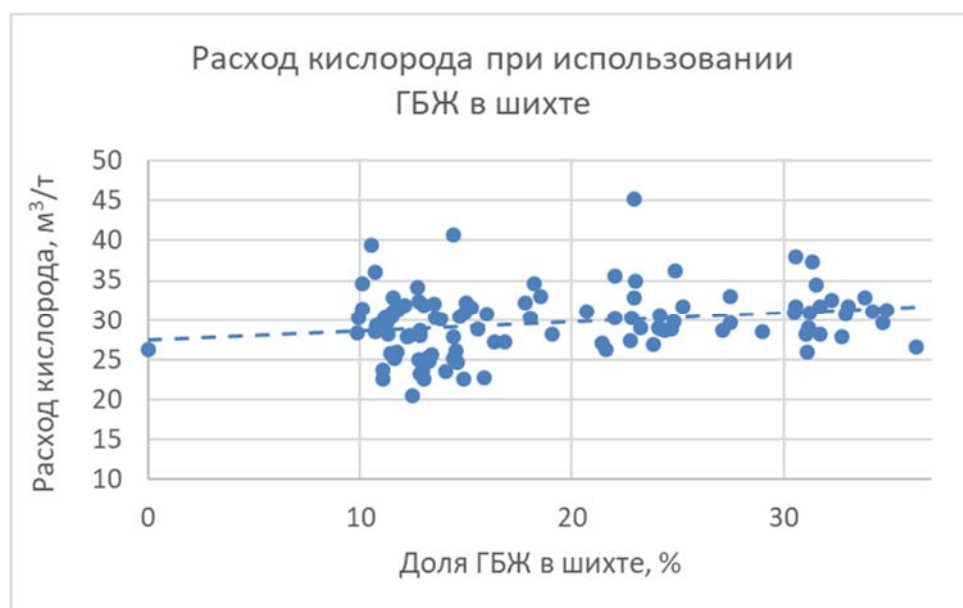


Рис. 3.15. Удельный расход кислорода в зависимости от доли ГБЖ в шихте.

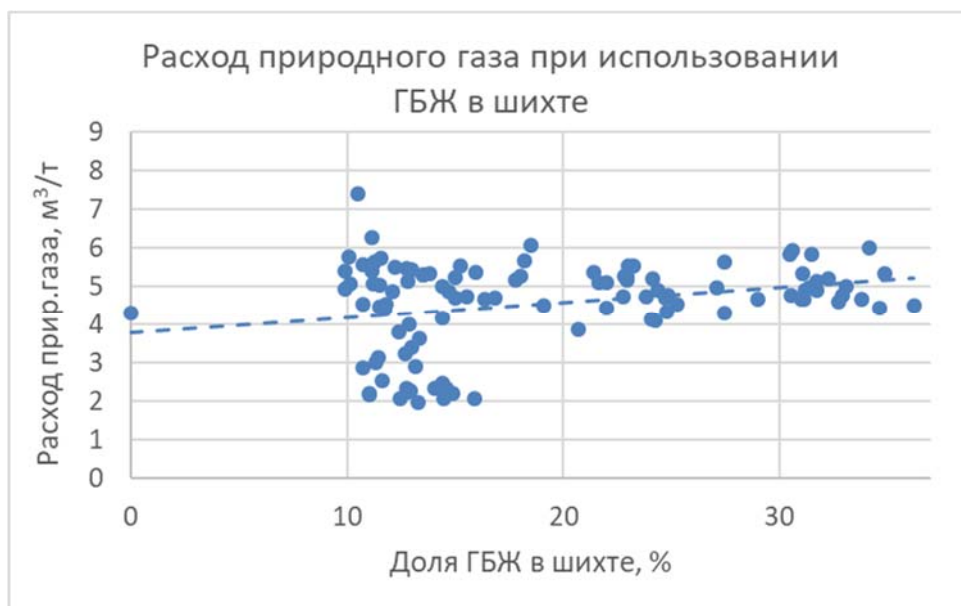


Рис. 3.16. Удельный расход природного газа в зависимости от доли ГБЖ в шихте.

Учитывая относительно низкое содержание углерода в ГБЖ, необходимого для восстановления оксида железа, количество отдаваемого антрацита и кокса увеличивали (рис. 3.17).

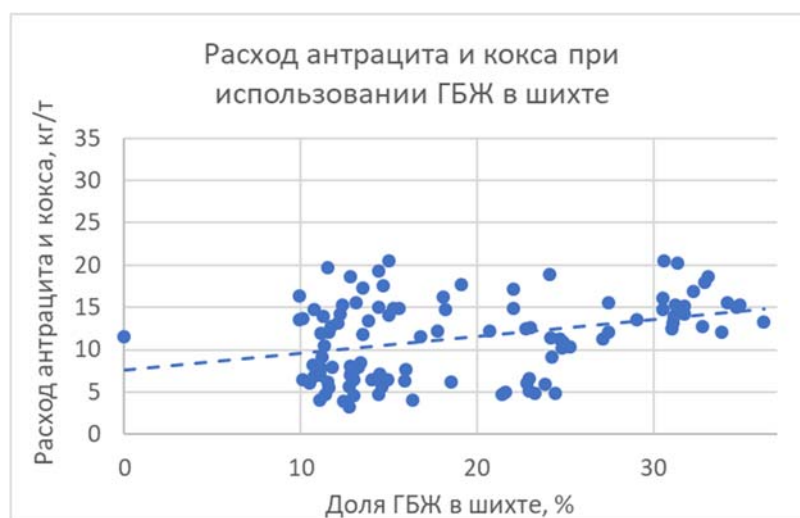


Рис. 3.17. Удельный расход антрацита и кокса в зависимости от доли ГБЖ в шихте.

Расход извести поддерживали примерно на одном уровне при увеличении доли ГБЖ (рис.3.18), при этом содержание фосфора в полупродукте также находилось на одном уровне в среднем около 0,008%. Для поддержания шлака определенной консистенции количество отдаваемых шлакообразующих определял сталевар.



Рис. 3.18. Удельный расход извести в зависимости от доли ГБЖ в шихте.

Насыщение шлака оксидом магния способствует созданию гарнисажа на стенах футеровки печи и повышает ее стойкость. Отмечена тенденция увеличения расхода магнезиального флюса в зависимости от доли ГБЖ. Данный флюс отдают для насыщения шлака оксидом магния с целью снижения износа магнезиальноуглеродистого кирпича и магнезиальных стен футеровки ДСП (рис.3.19).

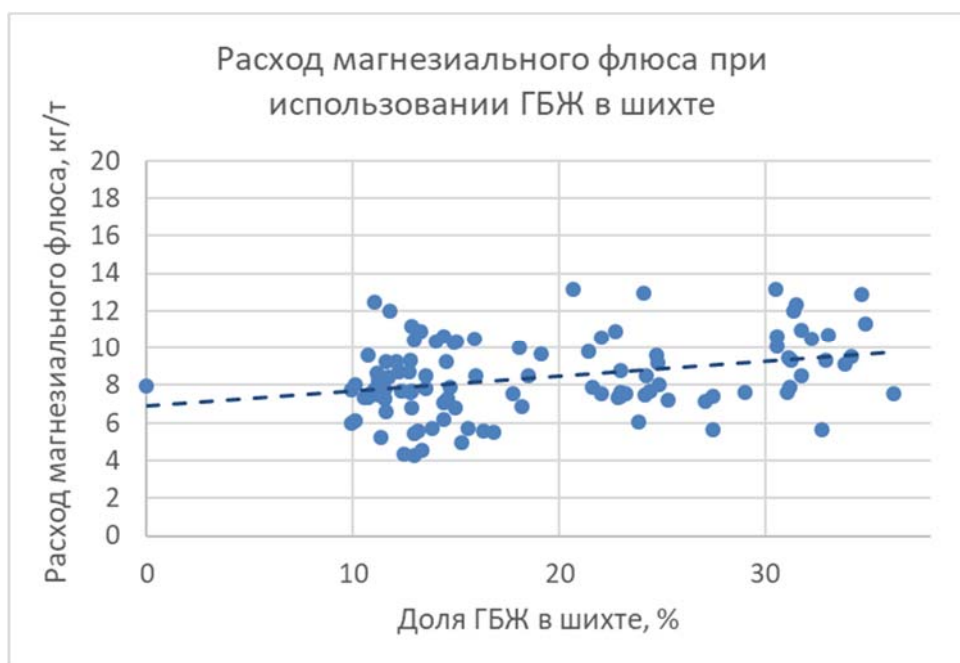


Рис. 3.19. Удельный расход MgO-содержащего флюса в зависимости от доли ГБЖ в шихте.

В таблице 3.1 представлено сравнение средних удельных технологических показателей работы печи при использовании ГБЖ и работе на 100 % ломе при выплавке стали в ДСП-150 в условиях ВТЗ.

Таблица 3.1. Сравнительные удельные технологические показатели (средние) электроплавов при использовании ГБЖ в шихте и при работе на 100 % ломе в ДСП-150 ВТЗ.

№	Показатель	Режим работы ДСП-150		Отклонение, %
		На 100 % ломе (49 плавов)	С использованием ГБЖ (201 плавка)	
1	Процент ГБЖ в завалке, %	0	12,9	-
2	Расход электроэнергии, кВт·ч/т	387	426	10,2
3	Расход кислорода, м ³ /т	37,0	41,9	13,1
4	Расход природного газа, м ³ /т	5,56	5,76	3,6
5	Расход извести, кг/т	51,5	55,9	8,5
6	Расход магнезиально-известкового флюса, кг/т	10,40	10,55	1,4
7	Температура металла на выпуске, °С	1643	1632	-0,7
8	Вес завалки, т	162,9	168,5	3,3
9	Вес плавки, т	151,6	147,6	-2,7
10	Расходный коэффициент	1,0745	1,1416	6,2
11	Длительность цикла плавки, мин	76,0	75,9	-0,14

Из таблицы 3.1 видно, что при эксплуатации ДСП со средним содержанием ГБЖ в шихте 12,9%, по сравнению с работой ДСП на 100% металлическом ломе, возрастают средние удельные технологические показатели: расход электроэнергии – на 10,2%, кислорода на 13,1%, природного газа – на 3,6%. Вместе с этим увеличивали расход извести и магнезиально-известкового флюса. Средний удельный расход извести вырос на 8,5%, магнезиально-известкового флюса - на 1,4 %. Средняя температура металла на выпуске из ДСП при использовании добавки ГБЖ составила 1632°С, что ниже температуры металла на выпуске при работе на 100% ломе – 1643°С. Длительность цикла плавки при разных режимах находилась на одном уровне. Средний вес плавки при

использовании ГБЖ в шихте снизился на 2,7%. Максимальное количество ГБЖ в завалке за анализируемый период составило 40,8 т (24% от массы завалки).

Также в условиях ДСП-150 на ТАГМЕТ был проведен сравнительный анализ влияния добавки ГБЖ за отчетные периоды. Для оценки влияния добавки ГБЖ были использованы показатели работы ДСП-150 при использовании ГБЖ (массив из 345 плавок, из них 165 плавок с использованием ГБЖ, февраль 2015 г.) и без использования ГБЖ (массив из 360 плавок, ноябрь 2014 г.), которые представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Сравнительные удельные технологические показатели (средние) электроплавов при использовании ГБЖ в шихте и работе на 100 % ломе в ДСП-150 ТАГМЕТ.

№	Показатель	Режим работы ДСП-150		Отклонение, %
		На 100 % ломе (11.2014 г.)	С использованием ГБЖ (02.2015 г.)	
1	Анализируемый массив плавок, шт.	360	345 (в т.ч. плавки с ГБЖ 165 пл.)	-
2	Общее количество ГБЖ, т	0	6175,7 (до 51 т в завалке)	-
3	Средний процент ГБЖ в завалке, %	0	11,2 (макс. 36% в завалке)	-
4	Расход электроэнергии, кВт·ч/т	425,5	511,5	20,2
5	Расход кислорода, м ³ /т	39,9	40,9	2,5
6	Расход антрацита, кг/т	11,5	12,7	10,4
7	Расход углеродсодержащего порошка, кг/т .	7,7	10,7	39,0
8	Расход извести, кг/т	56,0	75,5	34,8
9	Расход магнезиально-известкового флюса, кг/т	6,5	9,1	40,0
10	Длительность цикла плавки, мин	76,0	73,0	-3,9
11	Длительность плавки под током, мин	49,0	54,0	10,2
12	Расходный коэффициент	1,16	1,26	8,6

Из таблицы 3.2 видно, что при среднем содержании ГБЖ в шихте 11,2%, по сравнению с работой ДСП на 100% ломе, возрастают средние удельные технологические показатели: расход электроэнергии – на 20,2%, кислорода на 2,5%, антрацита – на 10,4%, углеродсодержащего порошка – на 39%. Вместе с этим увеличивали расход извести и магнезиально-известкового флюса. Средний удельный расход извести вырос на 34,8%, магнезиально-известкового флюса - на 40%. Длительность плавки под током при разных режимах увеличилась на 10,2%, при этом длительность цикла плавки снизилась на 3,9%, что обусловлено снижением количества подвалок с 3-х до 2-х. Расходный коэффициент увеличился на 8,6%. Максимальное количество ГБЖ в завалке за анализируемый период составило 51 т (36% от массы завалки). В связи с увеличением расхода извести и магнезиально-известкового флюса, а также наличием пустой породы в ГБЖ отмечено значительное увеличение общего количества шлака в среднем на 16-19 кг/т.

Из представленных данных видно, что добавка ГБЖ при увеличении его доли в шихте оказывает влияние на энерготехнологические показатели и на разных ДСП проявляет себя по-разному. Это требует разработки оптимальных энерготехнологических режимов плавки с учетом конкретных условий эксплуатации ДСП.

На примере ДСП-150 таких предприятий, как ВТЗ и ТАГМЕТ показано, что увеличение добавки ГБЖ приводит к повышению расхода энерготехнологических показателей плавки и шлакообразующих материалов. Повышение удельного расхода электроэнергии при увеличении доли ГБЖ в шихте обусловлено повышенным количеством образующегося шлака и наличием оксидов железа в ГБЖ, на восстановление которых необходимы энергетические затраты. Наличие пустой породы в брикетах снижает коэффициент электропроводности шихты, что также отражается на расходе электроэнергии. Подача кислорода в печь осуществляется совместно с подачей углеродсодержащих материалов для поддержания вспененного шлака в процессе выплавки стали. При использовании ГБЖ количество шлака увеличивается и требуется дополнительное повышение кислорода и углеродсодержащих материалов. В связи с этим возникает необходимость более подробного рассмотрения режима плавки и поиска оптимального решения его ведения.

3.1.1. Исследование влияния различных параметров плавки на технологические показатели при использовании ГБЖ

В условиях ДСП-150 ВТЗ была проведена оценка влияния добавки ГБЖ при различных температурах металла на выпуске из печи и при различном содержании в нем углерода на основные технологические показатели плавки.

Для оценки анализируемые данные (201 плавка) были систематизированы и разбиты по разным интервалам температур выпуска. Усредненные данные по каждому интервалу представлены в табл. 3.3. Анализируемый массив данных был разделен на интервалы температур выпуска металла таким образом, что в каждом интервале находилось одинаковое количество плавков.

Таблица 3.3. Основные технологические показатели плавки в ДСП при разных интервалах температур металла на выпуске из ДСП.

Интервал температур металла на выпуске, °С		Удельные технологические показатели плавки (средние по интервалу температур)									
		Расход эл.энергии, кВт·ч/т		Расход кислорода, м³/т		Расход прир. газа, м³/т		Расход извести, кг/т		Расход магнез. флюса, кг/т	
		без ГБЖ	с ГБЖ	без ГБЖ	с ГБЖ	без ГБЖ	с ГБЖ	без ГБЖ	с ГБЖ	без ГБЖ	с ГБЖ
1575-1615	ΔT_1	383	434	37,0	42,3	5,47	5,73	50,1	56,6	10,1	11,0
1616-1635	ΔT_2	395	430	36,6	42,0	5,39	5,66	48,2	57,5	10,9	11,1
1636-1650	ΔT_3	381	428	36,0	40,6	5,63	5,76	54,3	56,3	9,7	10,1
1651-1730	ΔT_4	385	431	38,1	45,0	5,71	5,94	52,6	59,8	10,5	11,0

Данные из таблицы 3.3 представлены в гистограммах на рис. 3.20 – 3.24, откуда видно, что основные технологические показатели плавков возрастают при использовании ГБЖ в шихте при всех интервалах температур стали на выпуске из ДСП.



Рис. 3.20. Удельный расход электроэнергии (средний) при разных интервалах температур стали на выпуске.

Из гистограмм на рис. 3.20 видно, что при использовании ГБЖ расход электроэнергии увеличивался на каждом интервале с температурами металла на выпуске.



Рис. 3.21. Удельный расход кислорода (средний) при разных интервалах температур стали на выпуске.

Из гистограмм на рис. 3.21 видно, что при использовании ГБЖ расход кислорода увеличивали на каждом интервале с температурами металла на выпуске.



Рис. 3.22. Удельный расход природного газа (средний) при разных интервалах температур стали на выпуске.

Из гистограмм на рис. 3.22 видно, что при использовании ГБЖ расход природного газа увеличивали на каждом интервале с температурами металла на выпуске.

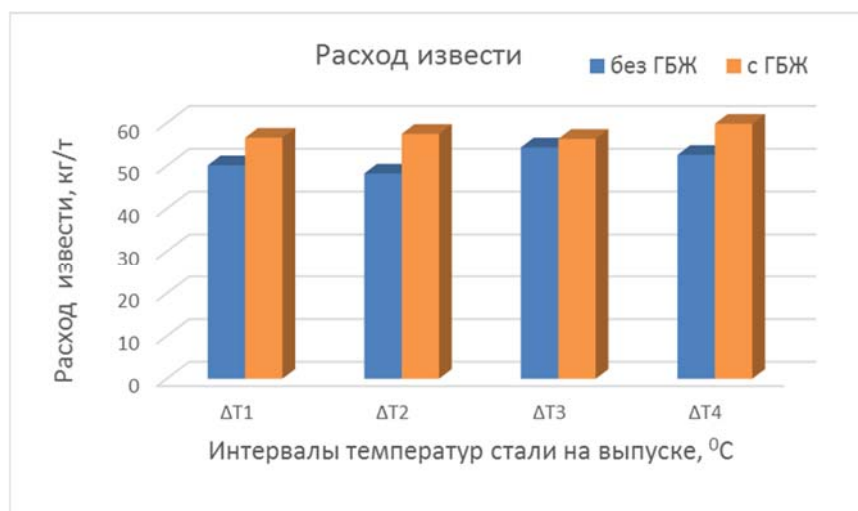


Рис. 3.23. Удельный расход извести (средний) при разных интервалах температур стали на выпуске.

Расход извести при использовании ГБЖ увеличивали пропорционально доле ГБЖ в шихте. Из гистограмм на рис. 3.23 видно, что при использовании ГБЖ расход извести увеличен на каждом интервале температур металла на выпуске.

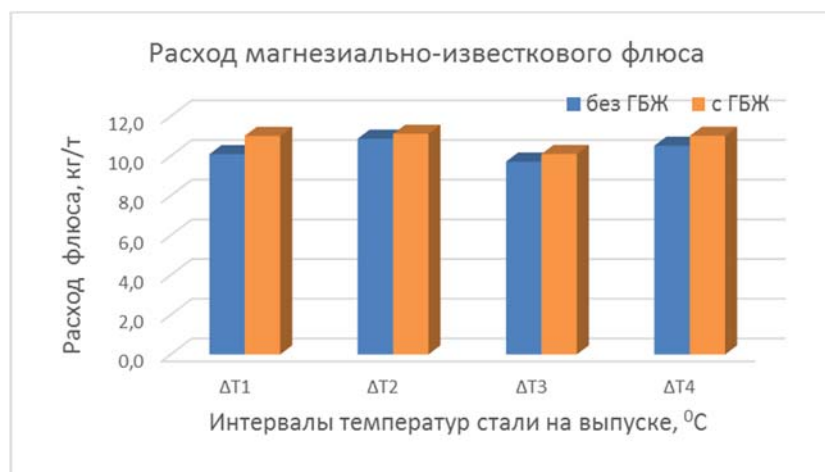


Рис. 3.24. Удельный расход магнезиально-известкового флюса (средний) при разных интервалах температур стали на выпуске.

Увеличение расхода магнезиально-известкового флюса также производили на всех интервалах с температурами стали на выпуске при использовании ГБЖ (рис. 3.24).

Для оценки влияния добавки ГБЖ на основные технологические показатели плавки при различных содержаниях углерода в полупродукте анализируемые данные (201 плавка) были систематизированы и разбиты по разным интервалам содержаний углерода, усреднены и представлены в таблице 3.4. Анализируемый массив данных был разделен на

интервалы содержаний углерода в полупродукте таким образом, что в каждом интервале находилось одинаковое количество плавов.

Таблица 3.4. Основные технологические показатели плавки в ДСП при разных интервалах содержаний углерода в полупродукте.

Интервал содержаний углерода, %		Удельные технологические показатели плавки (средние по интервалу содержания углерода в полупродукте)									
		Расход электро- энергии, кВт·ч/т		Расход кислорода, м ³ /т		Расход природного газа, м ³ /т		Расход извести, кг/т		Расход магnez. флюса, кг/т	
		без ГБЖ	с ГБЖ	без ГБЖ	с ГБЖ	без ГБЖ	с ГБЖ	без ГБЖ	с ГБЖ	без ГБЖ	с ГБЖ
< 0,05	ΔC1	354	432	33,8	46,6	5,96	6,06	59,6	62,3	6,9	11,1
0,05- 0,07	ΔC2	392	432	36,0	41,5	5,55	5,71	52,0	58,6	10,5	10,7
0,07- 0,09	ΔC3	380	427	35,9	41,0	5,31	5,73	50,1	55,4	10,8	10,5
0,09-0,2	ΔC4	403	430	40,1	42,3	5,86	5,62	52,7	55,4	10,7	11,2
> 0,2	ΔC5	389	436	38,8	43,2	5,74	5,62	48,7	58,1	10,3	11,2

Данные из таблицы 3.4 представлены в гистограммах на рис. 3.25 – 3.29, из которых видно, что основные технологические показатели плавов возрастают при использовании ГБЖ в шихте при всех интервалах содержаний углерода в полупродукте.



Рис. 3.25. Удельный расход электроэнергии (средний) при разных интервалах содержаний углерода в полупродукте.

Из гистограмм на рис. 3.25 видно, что при использовании ГБЖ расход электроэнергии увеличивался на каждом интервале с различным содержанием углерода в полупродукте.

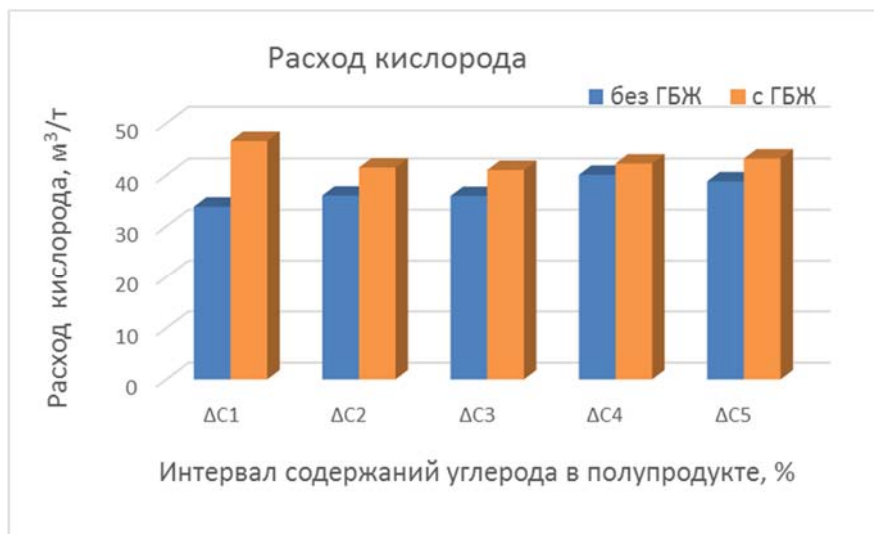


Рис. 3.26. Удельный расход кислорода (средний) при разных интервалах содержаний углерода в полупродукте.

Из гистограмм на рис. 3.26 видно, что при использовании ГБЖ расход кислорода увеличивали на каждом интервале с различным содержанием углерода в полупродукте.

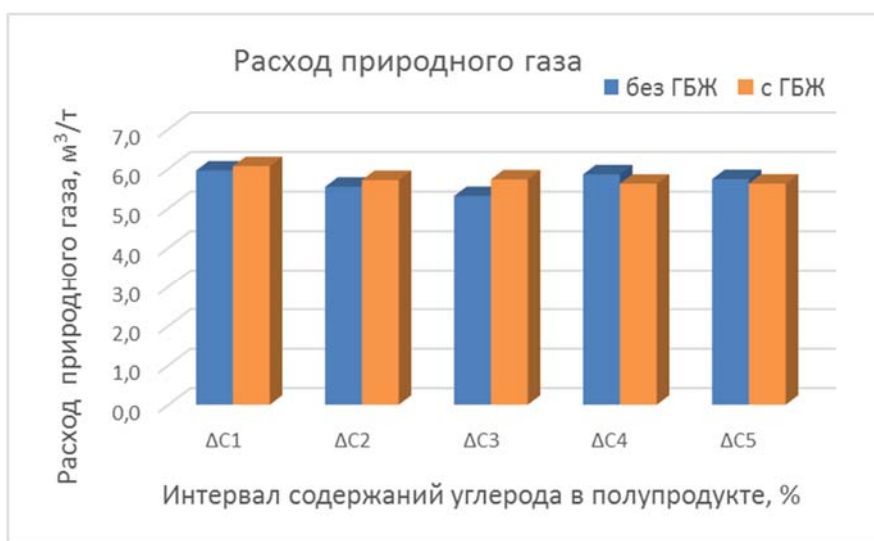


Рис. 3.27. Удельный расход природного газа (средний) при разных интервалах содержаний углерода в полупродукте.

Из гистограмм на рис. 3.27 видно, что на плавках с использованием ГБЖ и на плавках со 100% ломом расход природного газа находился примерно на одном уровне при различных содержаниях углерода в полупродукте.

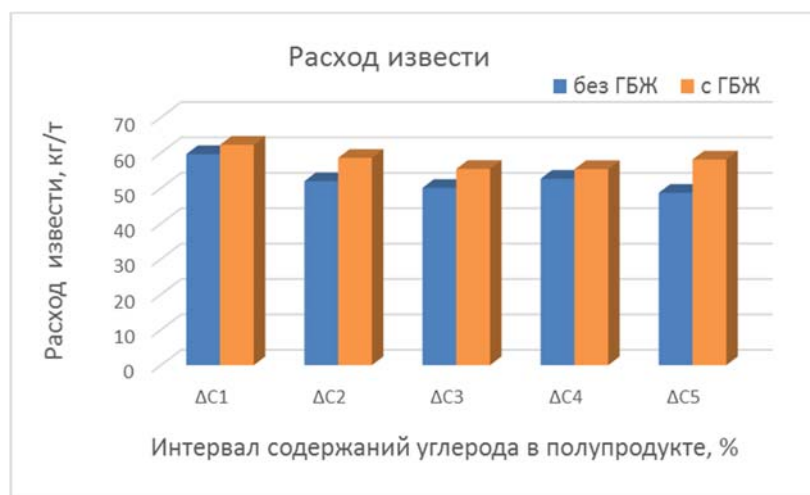


Рис. 3.28. Удельный расход извести (средний) при разных интервалах содержаний углерода в полупродукте.

Из гистограмм на рис. 3.28 видно, что при использовании ГБЖ расход извести был увеличен на каждом интервале содержаний углерода в полупродукте.

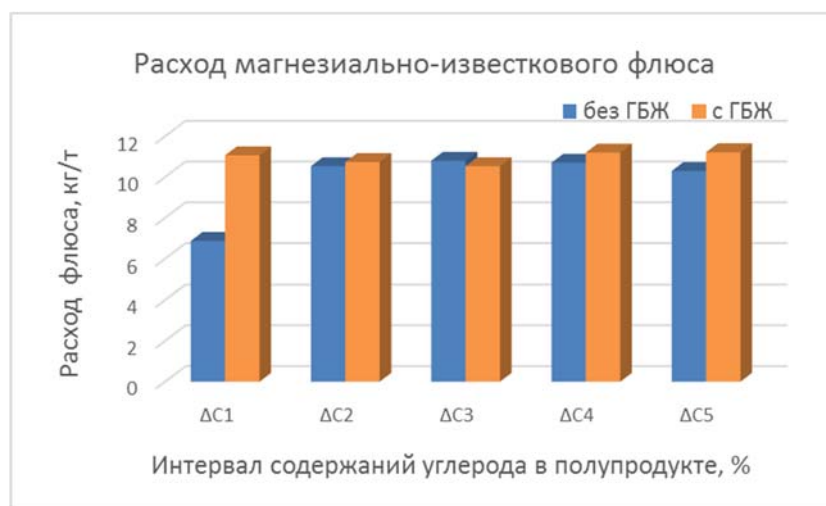


Рис. 3.29. Удельный расход магнезиально-известкового флюса (средний) при разных интервалах содержаний углерода в полупродукте.

Из гистограмм на рис. 3.29 видно, что при использовании ГБЖ расход магнезиально-известкового флюса увеличивали. Увеличение расхода MgO-флюса наблюдается практически на каждом интервале содержаний углерода.

Из представленных на диаграммах данных видно, что рост основных энергетических показателей наблюдается на всех анализируемых интервалах температур полупродукта на выпуске и на всех интервалах содержаний углерода в стали.

3.1.2. Влияние добавки ГБЖ на содержание углерода в полупродукте и окисленность системы металл-шлак

Анализ массива плавов 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 плавов 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. 3.30). 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.

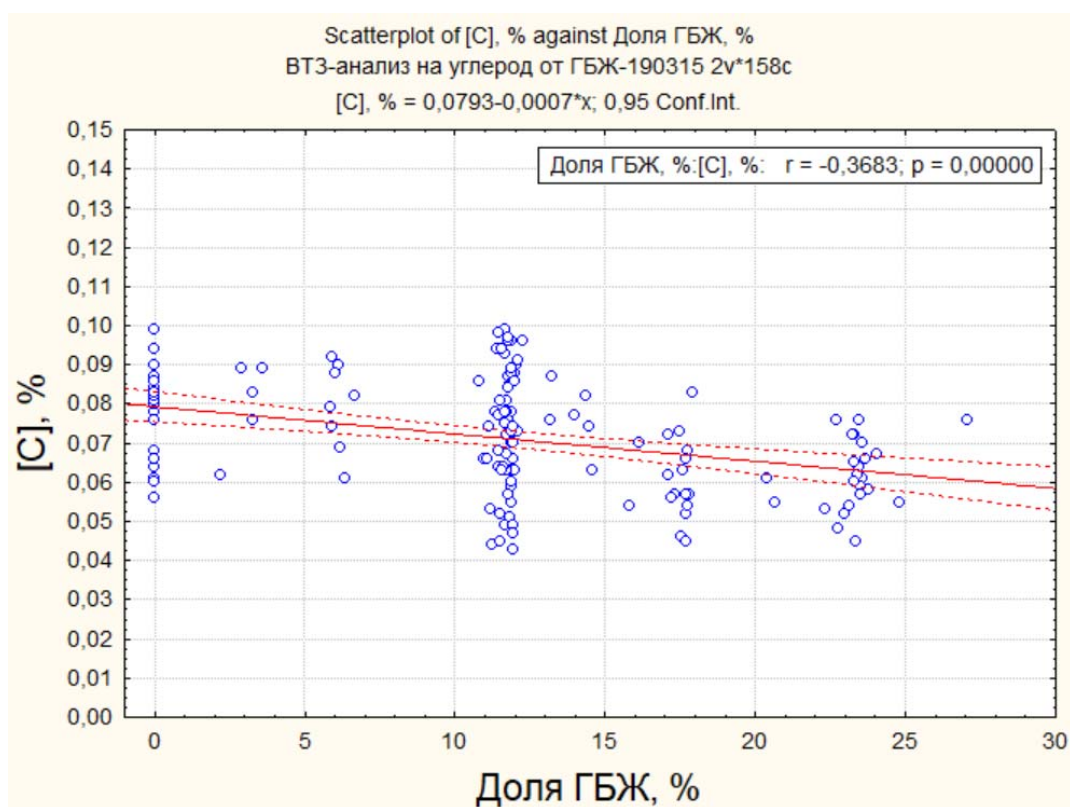


Рис. 3.30. Содержание углерода в полупродукте в зависимости от доли ГБЖ в шихте.

При этом среднее содержание оксидов железа в шлаке при введении добавки ГБЖ увеличивалось с 24 до 30% (рис. 3.31). Однако, повышение окисленности шлака более 35-40% (FeO) по мнению ряда исследователей приводит к затруднению его вспенивания и повышению расхода электроэнергии. В работе [23] установлено, что при окисленности шлака более 40% (особенно более 50%) затруднена кампания по его вспениванию и это

приводит к увеличенному расходу электроэнергии. Для снижения расхода электроэнергии требуется удерживать общую окисленность шлака не более 40%.

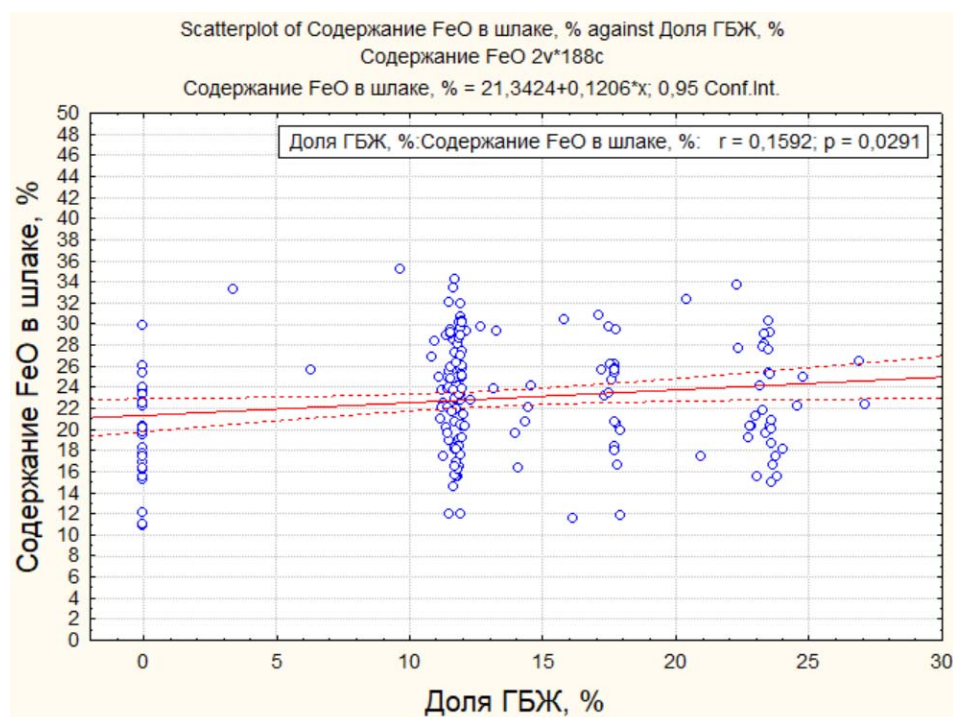


Рис. 3.31. Содержание оксидов железа в шлаке в зависимости от доли ГБЖ в шихте.

Рассмотрим влияние добавки ГБЖ на содержание углерода в полупродукте в зависимости от окисленности шлака. Для анализа была использована 41 плавка, произведенная с использованием ГБЖ в металлошихте с долей более 15% и 32 плавки, произведенных без использования ГБЖ (рис. 3.32). Содержание углерода в полупродукте в обоих массивах составляло менее 0,1%.

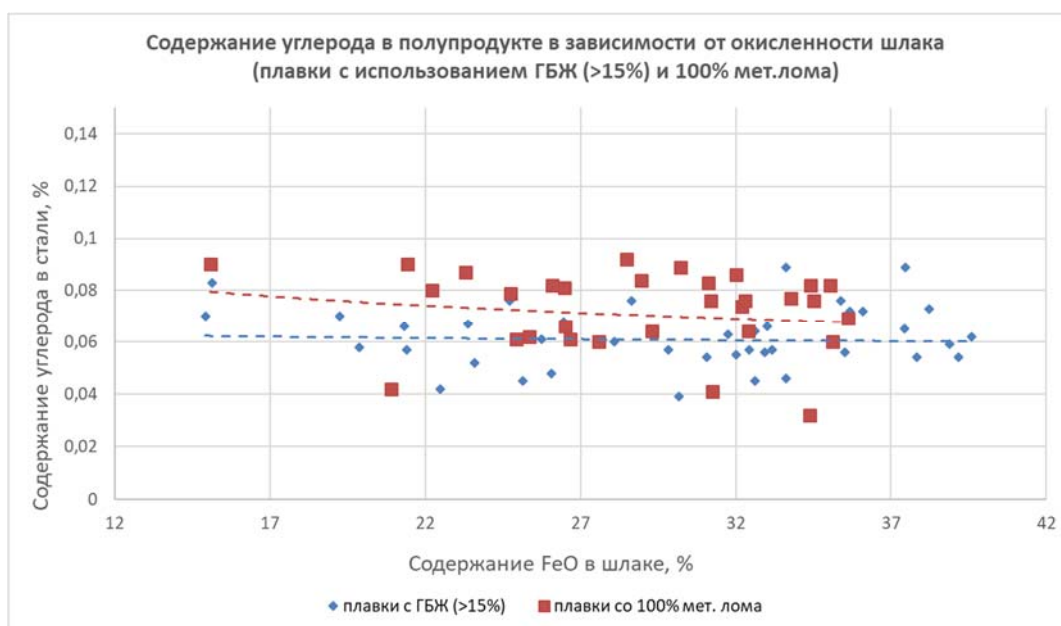


Рис. 3.32. Содержание углерода в полупродукте в зависимости от окисленности шлака.

Из графиков на рис. 3.32 видно, что содержание углерода в полупродукте, при одном и том же содержании оксидов железа в шлаке, ниже на плавках, произведенных с использованием ГБЖ в шихте по сравнению с плавками, произведенными с использованием 100% металлического лома.

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% ($\text{FeO} < 25\%$).

Дополнительно был проведен анализ на окисленность полупродукта в зависимости от доли ГБЖ в шихте (рис. 3.33), 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.

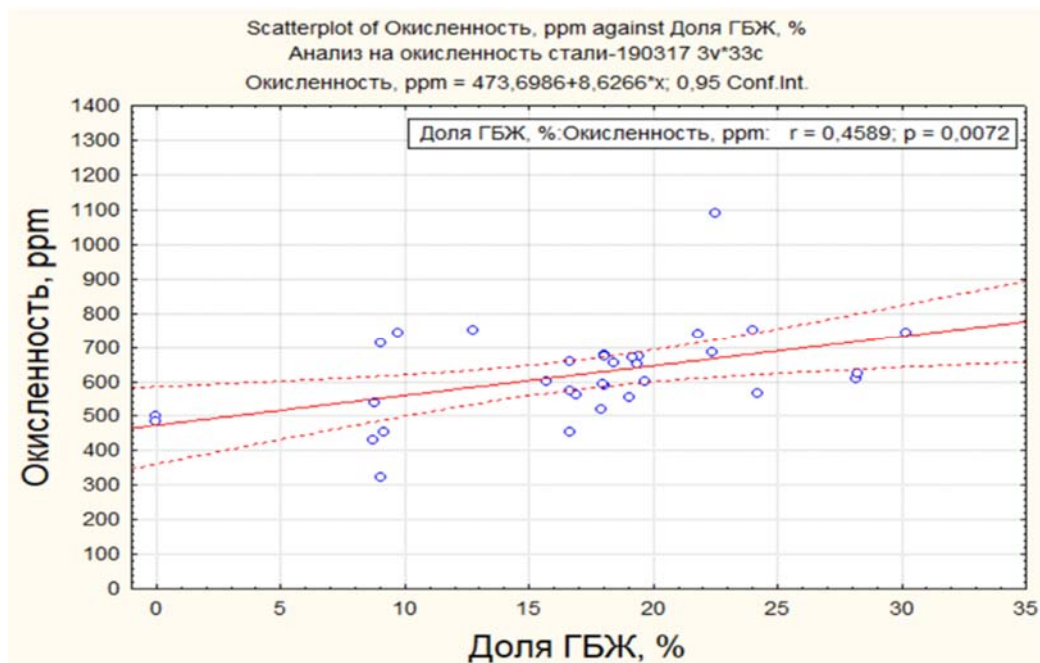


Рис. 3.33. Окисленность полупродукта в зависимости от доли ГБЖ в шихте.

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 (3.4). Это приводит к повышению окисленности жидкой ванны и требует дополнительного введения углеродсодержащих материалов.



Характерным для губчатого железа является очень большая удельная поверхность, включая внешнюю поверхность кусков и внутреннюю поверхность открытых пор. Большая величина внутренней поверхности железа прямого восстановления объясняется высокой пористостью и очень малым размером пор, возникающих в результате изменения кристаллографической структуры при превращении окислов в металлическое железо. Низкой теплопроводностью в сочетании с большой удельной поверхностью и химической активностью восстановленного железа определяют его повышенную склонность к окислению [136].

3.2. Образование тугоплавких шлакометаллических конгломератов (айсбергов) при использовании ГБЖ

Порционная загрузка большого количества ГБЖ в ванну ДСП может приводить к проблемам, связанным в первую очередь со значительным снижением стойкости рабочей футеровки печи. По разным данным не рекомендуется отдача более 20-30 % ГБЖ в печь при порционной загрузке [16, 51, 64, 73, 130, 164, 167, 184, 190]. Подача большого количества ГБЖ может привести к образованию огромных тугоплавких конгломератов, состоящих преимущественно из ГБЖ и локальному перегреву огнеупорной футеровки.

В процессе эксплуатации ДСП-150 при использовании большого количества ГБЖ в завалке отмечены случаи образования крупных шлакометаллических настывей на стенах и подине электропечи, а также повышенный износ футеровки в локальных зонах (рис. 3.34). Особенно это проявляется при доле ГБЖ более 25-30%. Это связано с недостаточным количеством энергетических затрат для расплавления образовавшихся из ГБЖ кластеров в локальных зонах ванны ДСП. Настыли привариваются к стенам печи и создают угрозу обрушения в ванну печи при выпуске плавки, повреждая при этом рабочую футеровку печи и приводят к поломке электродов при обрушении.

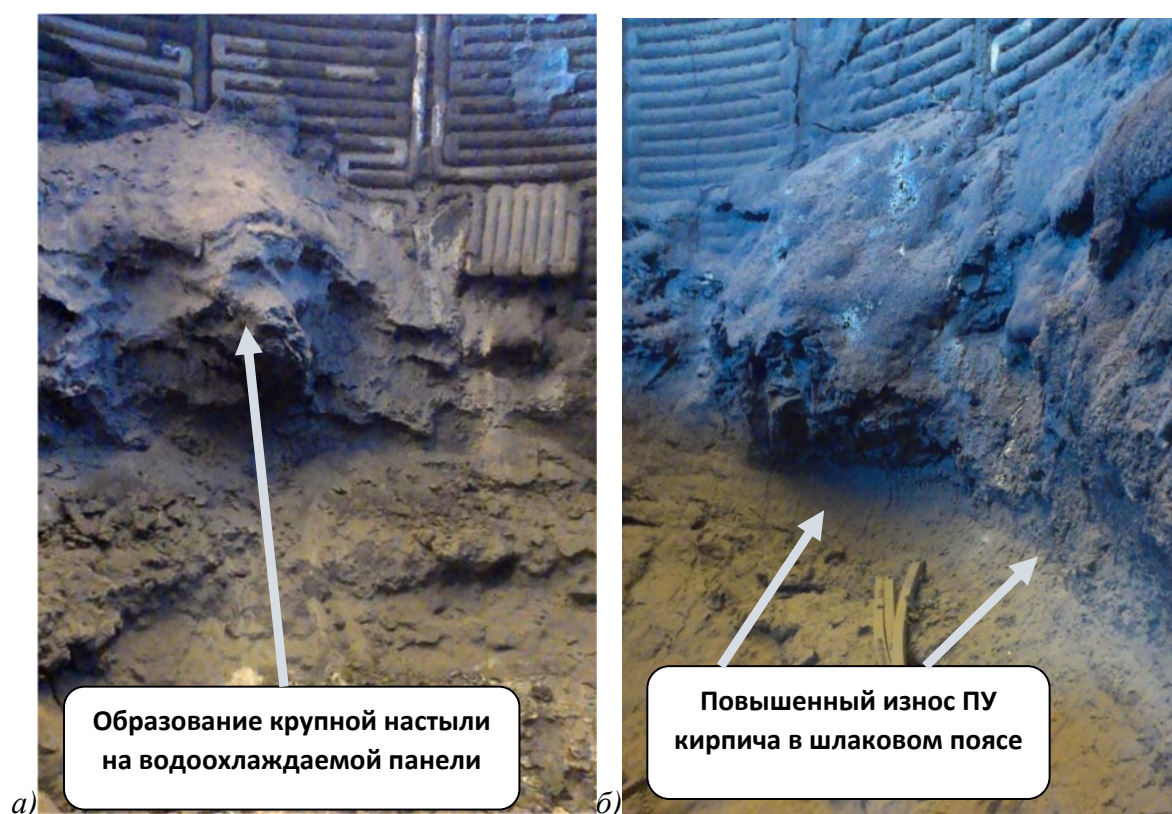


Рис.3.34. Состояние футеровки ДСП после окончания кампании (661 плавка).

При отдаче значительного количества ГБЖ (более 30%) зафиксировано также образование массивных тугоплавких конгломератов в ванне ДСП. На рис. 3.35, 3.36 показано состояние ванны ДСП после выпуска плавки (вид через рабочее окно), откуда видно образование крупных конгломератов. При выплавке стали на данных плавках количество ГБЖ в металлошихте составляло 50 т или около 33 % от массы завалки.



Рис.3.35. Образование крупных конгломератов из ГБЖ после выпуска плавки из ДСП.



Рис. 3.36. Образование крупных конгломератов из ГБЖ после выпуска плавки из ДСП.

На рис. 3.37 представлен тугоплавкий конгломерат (глыба) массой около 2,5 т, образовавшийся на стенах ДСП и извлеченный после окончания кампании футеровки печи. Глыба содержит спеченные между собой нерасплавленные, либо частично расплавленные компоненты завалки, а также шлак. С наружной стороны глыба имеет корочку, образованную при плавлении компонентов металлошихты и налетом шлака.



Рис.3.37. Тугоплавкая глыба, извлеченная из ДСП после окончания кампании футеровки печи.

Внутри, как видно, конгломерат состоит из нерасплавившихся компонентов завалки – ГБЖ, металлический лом, известь, кокс (рис.3.38, рис.3.39).



Рис.3.38. Компоненты конгломерата, извлеченного из ДСП после окончания кампании футеровки печи.



Рис.3.39. Компоненты тугоплавкой глыбы, извлеченной из ДСП после окончания кампании футеровки печи.

Тугоплавкие крупногабаритные настлы, которые привариваются к стенам футеровки печи, создают аварийную ситуацию, повышая вероятность обрушения в ванну ДСП при выпуске плавки и повреждения кирпичной кладки печи. На рис. 3.40. представлен металлический фрагмент, образовавшийся в результате прохода жидкого

металла в зазор (шов) кирпичной кладки футеровки. Появление зазора в кладке обусловлено падением крупногабаритной настилы, приваренной к футеровке печи.



Рис. 3.40. Металлический фрагмент, извлеченный из шва кирпичной кладки.

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. 3.41), 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.

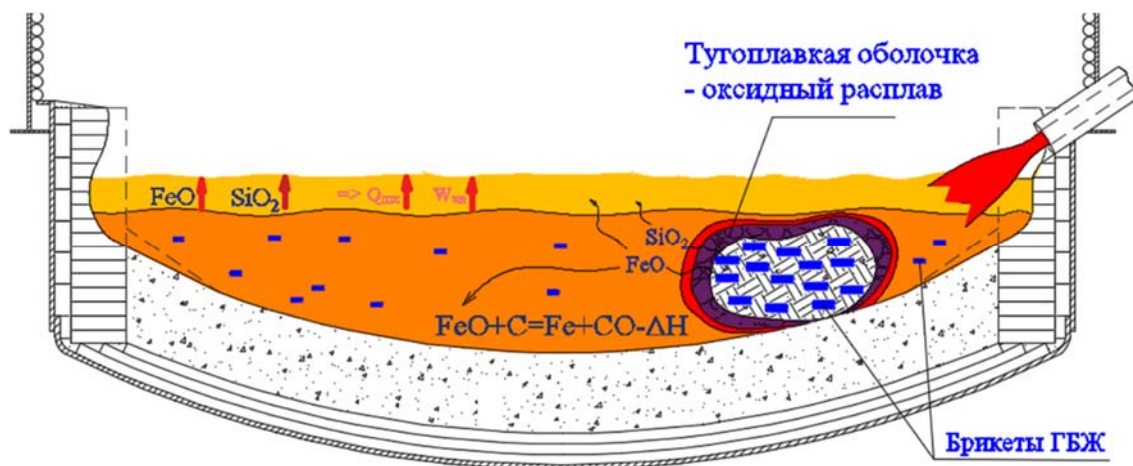


Рис. 3.41. Образование конгломерата в ванне печи при доле ГБЖ в шихте более 25%.

Анализ химического состава образовавшейся вокруг конгломерата тугоплавкой пористой оболочки, проведенный с использованием рентгенофлуоресцентного метода приведен в табл. 3.5 Отмечено высокое содержание в ней CaO. Тугоплавкая пористая оболочка снижает скорость плавления конгломерата.

Таблица 3.5. 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

Наружная оболочка конгломерата - твердый оксидный раствор, обладающий высокой температурой плавления и имеющий повышенную пористость. Образцы наружной металлической корочки представлены на рис. 3.42.



Рис.3.42. Образцы наружной оболочки конгломерата, извлеченного из ДСП после окончания кампании футеровки печи.

Согласно диаграммам состояния оксидных систем CaO-SiO₂-FeO и MgO-SiO₂-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.

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.

С другой стороны, гарнисажный слой на футеровке ДСП, образованный не расплавившимися компонентами металлошихты открывает возможность использования ГБЖ в качестве материала, который защищает футеровку печи, снижая ее износ. На рис. 3.43 показано состояние футеровки печи после кампании из 610 плавов. Видно, что на

кирпичной ПУ футеровке стен печи присутствует значительный слой гарнисажа, который может служить для нее защитным слоем. Образовавшийся гарнисажный слой на стенах печи состоит из шлака и не расплавившихся компонентов металлошихты.



Рис.3.43. Состояние футеровки ДСП после окончания кампании (610 плавов).

Создание гарнисажного слоя при определенном режиме ведения плавки (поддержание заданных характеристик шлака) и загрузки ГБЖ в печь позволит повысить стойкость футеровки печи и снизить расход огнеупорных материалов для ее обслуживания.

3.3. Способы порционной загрузки металлошихты, содержащей ГБЖ

Образование крупных тугоплавких конгломератов в печи связано в первую очередь с отдачей большого количества ГБЖ в металлошихте при порционной загрузке (более 25-30%), 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, на примере ДСП-150 были рассмотрены разные способы его порционной подачи в печь через завалочную бадью совместно с металлическим ломом.

Максимальное количество загруженного ГБЖ в завалку за анализируемый период составило 51 т или 36% от массы металлошихты. В процессе выплавки полупродукта в ДСП-150 ТАГМЕТ при разных вариантах его загрузки в бадью были зафиксированы следующие проблемы.

При загрузке ГБЖ в нижнюю часть завалочной бадьи (рис.3.44а) 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. 3.44б) 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.

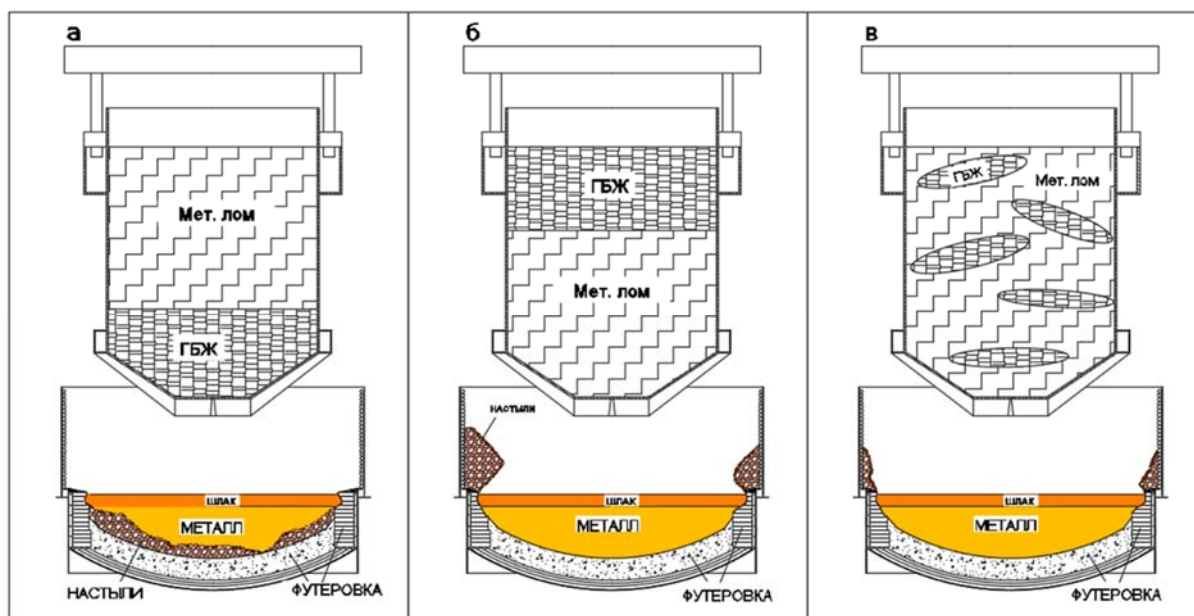


Рис. 3.44. Способы загрузки ГБЖ и металлического лома в ДСП-150.

Послойный способ загрузки ГБЖ и металлического лома оказался оптимальным вариантом отдачи сырья (рис. 3.44в), 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. ГБЖ при этом загружали в 1-ю завалочную бадью послойно совместно с ломом согласно 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.

Тем не менее, даже при послойном способе загрузке шихты при доле ГБЖ более 30% возможно образование крупных настывей на стенах и подине печи, а также массивных конгломератов в ванне. Образовавшиеся настыви прочно привариваются к кирпичной футеровке и водоохлаждаемым панелям печи выше уровня шлакового пояса, что обусловлено разницей температур между ними. Отсутствие достаточного количества тепла в локальных зонах ДСП не позволяет расплавить настыви, образовавшиеся выше шлакового пояса. Даже увеличение длительности плавления не позволяет расплавить образовавшиеся настыви и способствует перегреву и повышенному износу ПУ кирпича в шлаковом поясе.

3.4. Влияние добавки ГБЖ на содержание примесей в стали

Использование ГБЖ при выплавке стали в печи привлекательно тем, что качество получаемого полупродукта по содержанию вредных примесей и газов выше, чем при использовании 100% металлического лома. Это связано в первую очередь с чистотой ГБЖ по вредным примесям, таким как фосфор, медь, олово, никель, хром и др. Влияние добавок металлизированного сырья на качество выплавляемого металла показано в работах [136, 140, 173, 184, 192].

3.4.1. Анализ влияния ГБЖ на содержание фосфора, серы и азота. Анализ распределения фосфора между шлаком и металлом.

В условиях ЭСПЦ ВТЗ при выплавке стали в ДСП-150 был проведен анализ влияния добавки ГБЖ на содержание фосфора и серы в металле. Для анализа использовали массив, состоящий из 201 плавки, отобранный случайным образом из текущего производимого сортамента. Построены диаграммы, показывающие влияние доли ГБЖ на содержание примесей в стали, которые представлены на рисунках ниже. На диаграммах представлены уравнения аппроксимирующих кривых.

Анализ распределения фосфора с использованием металлизированного сырья с повышенным содержанием фосфора (0,061%) был проведен в работе [140], в которой показано, что наряду с процессом дефосфорации протекает процесс рефосфорации.

Одной из задач в данной работе была оценка распределения фосфора между шлаком и металлом и анализ термодинамики процесса дефосфорации при использовании

ГБЖ с низким содержанием фосфора. Ниже приведен расчет распределения фосфора между шлаком и металлом при использовании ГБЖ, содержащего не более 0,015% фосфора.

Для проведения расчета примем, что процесс дефосфорации проходит по реакции:



За стандартное состояние фосфора принят гипотетический однопроцентный раствор фосфора в жидком железе, обладающий свойствами бесконечно разбавленного; для оксида фосфора – чистый жидкий P_2O_5 . Константа равновесия реакции (3.5) имеет вид:

$$K_p = (a_{\text{PO}_{2,5}} \cdot a_{\text{Fe}}^{5/2}) / (a_{[P]} \cdot a_{\text{FeO}}^{5/2}) = (x_{\text{P}5+} \cdot \gamma_{\text{P}5+} \cdot a_{\text{Fe}}^{5/2}) / ([P] \cdot f_P \cdot a_{\text{FeO}}^{5/2}) = \\ = (x_{\text{P}5+} \cdot \gamma_{\text{P}5+}) / ([P] \cdot f_P \cdot a_{\text{FeO}}^{5/2}) \quad (3.6)$$

где $a_{\text{Fe}}^{5/2} \approx 1$.

Массовая ионная доля катиона фосфора в шлаке связана с его массовой долей соотношением:

$$x_{\text{P}5+} = (P) / (M_P \cdot \sum n_i),$$

где (P) – массовая доля фосфора в шлаке;

M_P – молярная масса фосфора, равная 31 г/моль;

$\sum n_i$ – количество молей катионов.

Тогда выражение (3.6) примет вид:

$$K_p = (P) / [P] \cdot \gamma_{\text{P}5+} / (31 \cdot \sum n_i \cdot f_P \cdot a_{\text{FeO}}^{5/2}), \text{ отсюда}$$

$$L_p = (P) / [P] = (31 \cdot K_p \cdot \sum n_i \cdot f_P \cdot a_{\text{FeO}}^{5/2}) / \gamma_{\text{P}5+} \quad (3.7)$$

Константу равновесия найдем из уравнения $\lg K_p = 1074 / T - 1,289$;

Коэффициент активности фосфора из $\lg f_P = e_P^P \cdot [P] + e_P^O \cdot [O] + e_P^C \cdot [C]$;

где $e_i^j = (1873/T) \cdot e_i^j(1873)$ – значения параметров взаимодействия при заданной температуре T.

Значения параметров взаимодействия в жидком железе при 1600 °C:

$$e_P^P(1873) = 0,054; e_P^O(1873) = 0,13; e_P^C(1873) = 0,126;$$

Начальное содержание фосфора примем

$$[P] = 0,012 \cdot D + 0,025 \cdot (1-D) \quad (3.8)$$

где D – доля ГБЖ в завалке.

Равновесное содержание кислорода и углерода под заданным шлаком найдем из выражений:

$$[O] = a_{\text{FeO}} / K_{\text{FeO}}; \quad [C] = 1 / (K_C \cdot a_{\text{FeO}});$$

где константы равновесия $\ln K_{\text{FeO}} = 14695/T - 6,366$; $\ln K_C = -12000/T + 11,14$.

Активность FeO в шлаке: $a_{\text{FeO}} = x_{\text{Fe}^{2+}} \cdot \gamma_{\text{Fe}^{2+}}$;

где выражение для коэффициента активности катиона железа имеет вид:

$$\ln \gamma_{\text{Fe}^{2+}} = 13592/T \cdot x_{\text{Si}^{4+}} \cdot (x_{\text{Ca}^{2+}} + x_{\text{Mg}^{2+}}) + 5052/T \cdot x_{\text{Si}^{4+}} \cdot x_{\text{Mn}^{2+}}.$$

Ионные доли катионов найдем из выражений: $x_{\text{Fe}^{2+}} = (\% \text{FeO}) / (M_{\text{FeO}} \cdot \Sigma n_i)$ и тд.

Количество молей катионов рассчитаем по формуле:

$$\Sigma n_i = (\% \text{FeO}) / M_{\text{FeO}} + (\% \text{MnO}) / M_{\text{MnO}} + (\% \text{CaO}) / M_{\text{CaO}} + (\% \text{MgO}) / M_{\text{MgO}} + (\% \text{SiO}_2) / M_{\text{SiO}_2} + 2(\% \text{Al}_2\text{O}_3) / M_{\text{Al}_2\text{O}_3}$$

Коэффициент активности катиона фосфора в шлаке можно найти по уравнению:

$$\ln \gamma_{\text{P}^{5+}} = \ln \gamma_{\text{Fe}^{2+}} - 24056/T \cdot x_{\text{Ca}^{2+}}$$

Для определения конечного содержания фосфора в полупродукте составим систему уравнений:

$$\begin{cases} [\text{P}]_{\text{н}} \cdot m_{\text{Ме}} + (\text{P})_{\text{н}} \cdot m_{\text{шл}} = [\text{P}]_{\text{к}} \cdot m_{\text{Ме}} + (\text{P})_{\text{к}} \cdot m_{\text{шл}} \\ L_{\text{р}} = (\text{P})_{\text{к}} / [\text{P}]_{\text{к}} \end{cases} \quad (3.9)$$

После проведения преобразований конечное содержание фосфора в полупродукте будет иметь вид:

$$[\text{P}]_{\text{к}} = ([\text{P}]_{\text{н}} + \lambda \cdot (\text{P})_{\text{н}}) / (1 + \lambda \cdot L_{\text{р}}) \quad (3.10)$$

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

Примем, что начальное содержание фосфора в шлаке равно нулю, тогда

$$[\text{P}]_{\text{к}} = [\text{P}]_{\text{н}} / (1 + \lambda \cdot L_{\text{р}}) \quad (3.11)$$

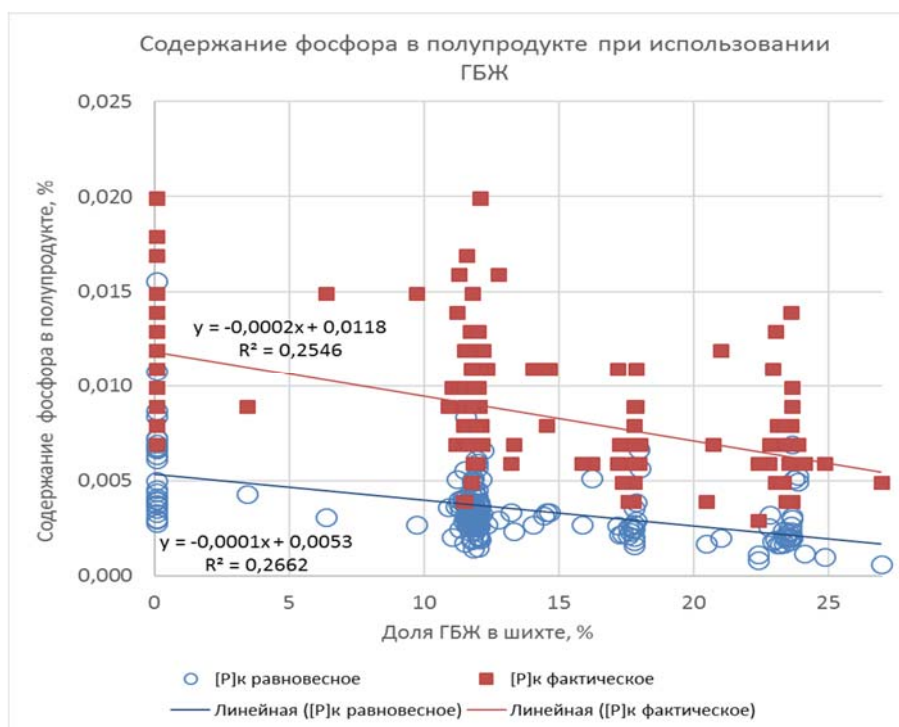


Рис. 3.45. Содержание фосфора в полупродукте в зависимости от доли ГБЖ в шихте.

На рис.3.45 представлено фактическое и равновесное содержание фосфора в полупродукте в зависимости от доли ГБЖ в шихте, откуда 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% при этом равновесное содержание фосфора, рассчитанное по формуле (3.11) также снижается.

Степень достижения равновесия, рассчитанная как $\alpha = Y(\text{факт}) / Y(\text{равн})$ при доле ГБЖ 0 и 25% соответственно равна:

$$\alpha(0\%) = 0,012/0,0055 = 2,2; \alpha(25\%) = 0,06/0,02 = 3,0.$$

Разброс данных обусловлен влиянием различной температуры металла, разным содержанием фосфора в металлическом ломе, разной основностью и окисленностью шлака, а также связан с нестабильностью шлакового режима, с малым временем его формирования, неравномерным перемешиванием и образованием конгломератов (“айсбергов”) в печи.

Среднее содержание P_2O_5 в шлаке при этом снижается с 0,42% до 0,32% (рис.3.46) при увеличении добавки ГБЖ, что вызвано увеличением количества шлака при повышении добавки ГБЖ и разбавлением оксида фосфора.

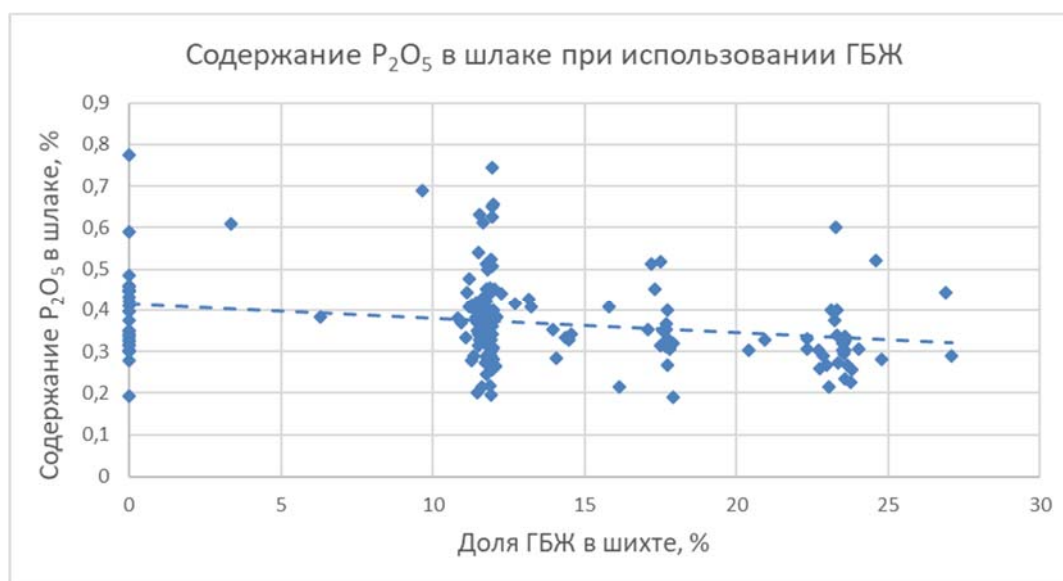


Рис. 3.46. Содержание оксида фосфора в шлаке в зависимости от доли ГБЖ в шихте.

Также на рис.3.47 представлена зависимость содержания оксида фосфора в шлаке от содержания оксидов железа, из которой видно, что увеличение оксидов железа в шлаке приводит к увеличению в нем содержания оксидов фосфора и, следовательно, к снижению фосфора в металле.

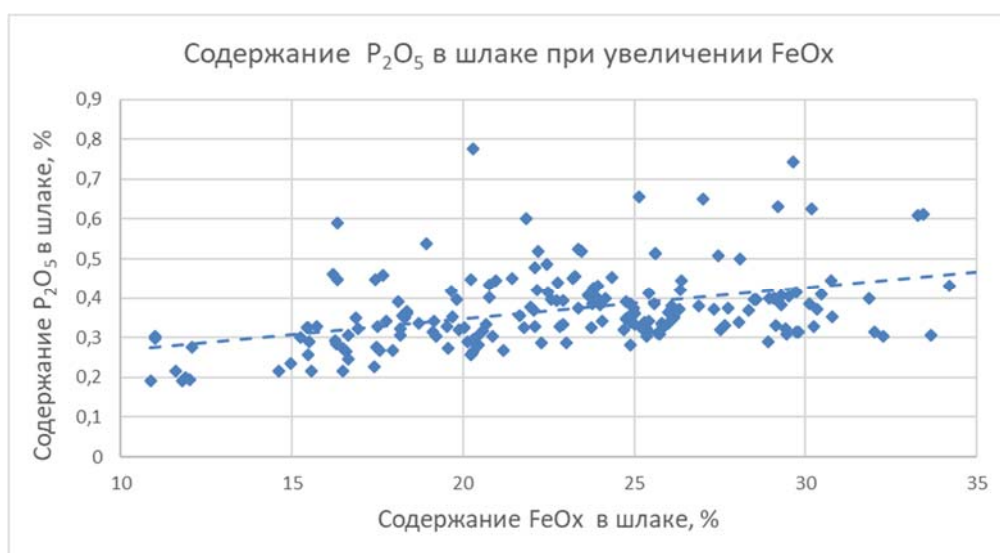


Рис. 3.47. Влияние содержания оксидов железа в шлаке на содержание в нем оксида фосфора.

Дефосфорация в условиях использования ГБЖ протекает достаточно полно, поскольку окисленность шлака высока.

При оценке распределения фосфора между металлом и шлаком в условиях использования ГБЖ также важно учитывать основность шлака в зависимости от доли ГБЖ. При анализе данного массива плавов среднее значение основности шлака находилось примерно на одном уровне (рис. 3.48) при увеличении доли ГБЖ в шихте при этом содержание фосфора в полупродукте снижалось. Это связано с чистотой ГБЖ по содержанию в нем фосфора, с повышенным количеством оксидов железа в шлаке и протеканием процесса дефосфорации.



Рис. 3.48. Основность шлака в зависимости от доли ГБЖ в шихте.

На рис.3.49 представлен фактический и равновесный коэффициент распределения фосфора в зависимости от доли ГБЖ в шихте. Равновесный коэффициент распределения

фосфора между шлаком и металлом рассчитывали по формуле (3.7), фактический коэффициент распределения фосфора рассчитывали по формуле:

$$L_{\phi} = (P_2O_5) * (62/142) / [P] \quad (3.12)$$

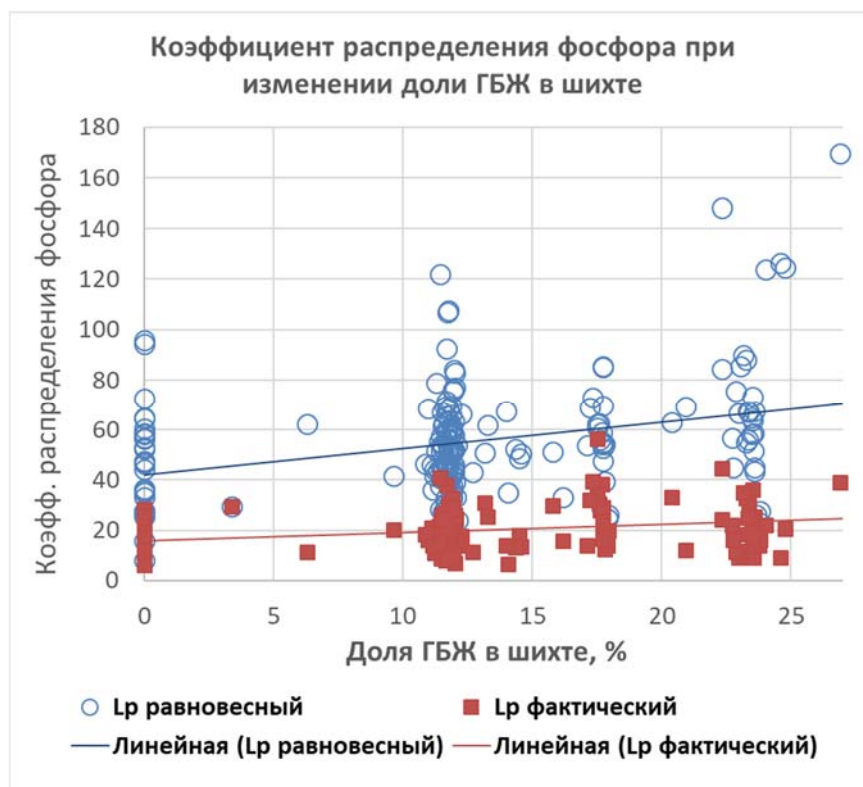


Рис. 3.49. Коэффициент распределения фосфора между шлаком и металлом при использовании ГБЖ в шихте.

При увеличении доли ГБЖ в шихте с 0 до 25% фактический коэффициент распределения фосфора между шлаком и металлом возрастает с 16 до 25, равновесный коэффициент возрастает с 43 до 67. Но учитывая разброс показателей процесс распределения фосфора при увеличении доли ГБЖ становится менее стабильный. Степень достижения равновесия находится на одинаковом уровне и при доле ГБЖ 0 и 25% соответственно равна:

$$\alpha (0\%) = 16/43 = 0,37; \alpha (25\%) = 25/67 = 0,37.$$

Разброс данных связан с нестабильностью шлакового режима, обусловленным повышенным количеством образующегося шлака, изменением его вязкости в связи с добавкой извести для поддержания заданной основности и с ограниченным временем плавления добавок извести и флюса.

Согласно законам термодинамики, на процесс дефосфорации оказывают влияние температура расплава, окисленность шлака и его основность. На рисунках ниже показано влияние данных параметров на содержание фосфора в полупродукте.

На рис. 3.50 показано влияние окисленности шлака на содержание фосфора в полупродукте.



Рис. 3.50. Влияние окисленности шлака на содержание фосфора в стали.

При увеличении содержания оксидов железа в шлаке с 15 до 45% среднее фактическое содержание фосфора в полупродукте снижается с 0,01 до 0,0075%, равновесное содержание фосфора снижается с 0,0055% до 0,002%. Значительный разброс значений фактических содержаний фосфора обусловлен нестабильностью шлакового режима. Степень достижения равновесия при содержании FeO 15% и 45% соответственно равна:

$$\alpha (15\%) = 0,01/0,0055 = 1,8; \alpha (45\%) = 0,0075/0,002 = 3,7.$$

На рис. 3.51 представлен коэффициент распределения фосфора между шлаком и металлом в зависимости от окисленности шлака.

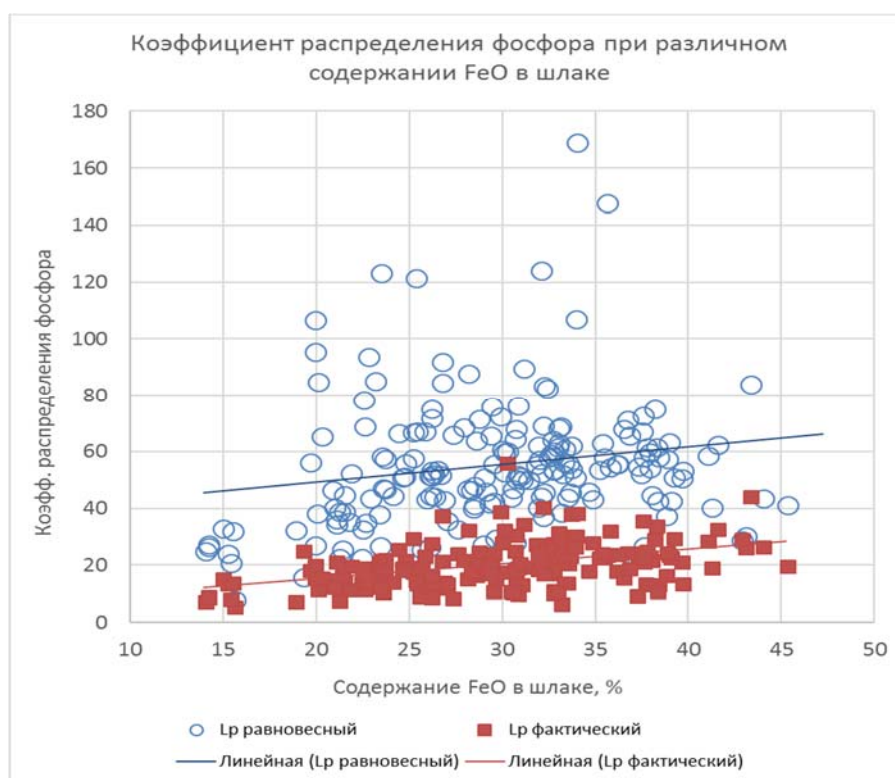


Рис. 3.51. Коэффициент распределения фосфора между шлаком и металлом в зависимости от содержания оксидов железа в шлаке.

Увеличение содержания оксидов железа в шлаке приводит к повышению коэффициента распределения фосфора между шлаком и металлом. Из представленных данных видно, что изменение коэффициента распределения фосфора в зависимости от содержания FeO подчиняется закону термодинамики. Степень достижения равновесия при содержании FeO 15% и 45% соответственно равна:

$$\alpha (15\%) = 13/45 = 0,29; \alpha (45\%) = 28 / 64 = 0,44.$$

На рис. 3.52 показано влияние температуры металла на содержание в нем фосфора.

При увеличении температуры металла перед выпуском среднее фактическое содержание фосфора в полупродукте, так же, как и равновесное, увеличивается. Степень достижения равновесия при температурах металла 1580 и 1700 °C соответственно равна:

$$\alpha (1580) = 0,0075/0,0025 = 3; \alpha (1700) = 0,01 / 0,005 = 2.$$

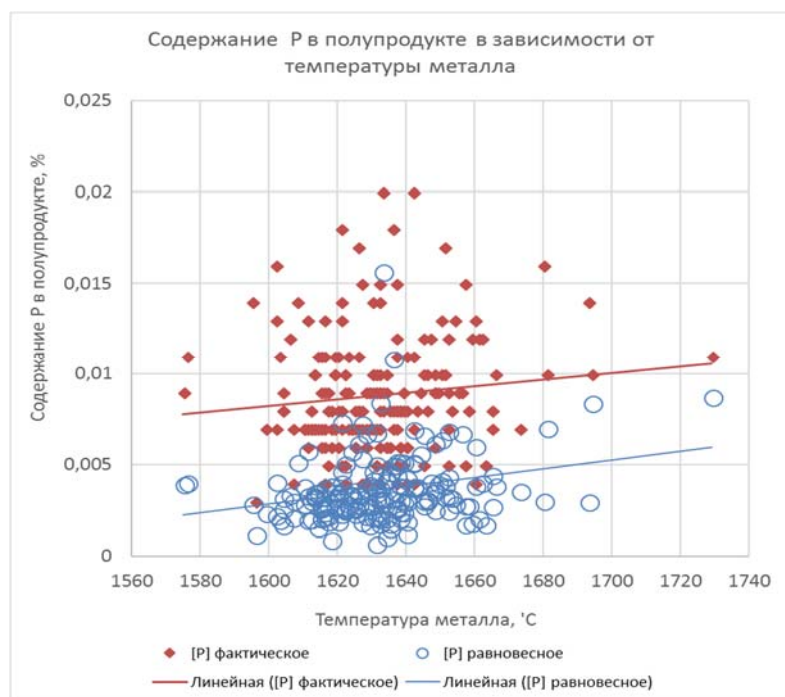


Рис. 3.52. Влияние температуры металла перед выпуском из печи на содержание фосфора в полупродукте.

На рис. 3.53 представлен коэффициент распределения фосфора между шлаком и металлом в зависимости от температуры полупродукта перед выпуском из печи.

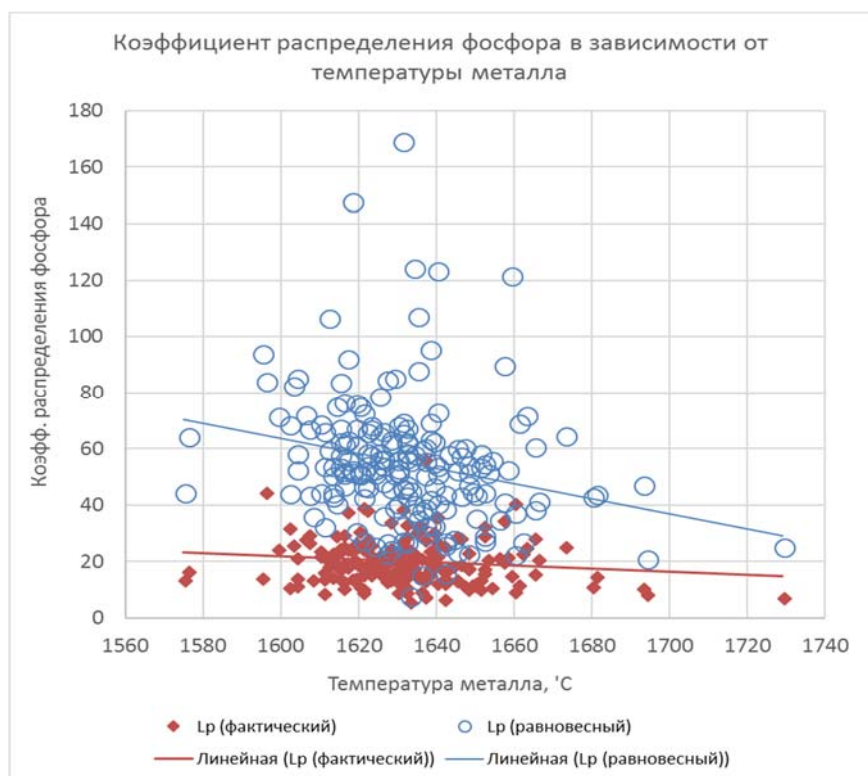


Рис. 3.53. Коеэффициент распределения фосфора между шлаком и металлом при изменении температуры металла на выпуске.

При увеличении температуры полупродукта на выпуске фактический и равновесный коэффициент распределения фосфора между шлаком и металлом снижается. Степень достижения равновесия при температурах металла 1580 и 1700 °С соответственно равна:

$$\alpha (1580) = 22/70 = 0,31; \alpha (1700) = 18/38 = 0,47.$$

На рис. 3.54 показано влияние основности шлака на содержание фосфора в полупродукте.



Рис. 3.54. Влияние основности шлака на содержание фосфора в стали.

При увеличении основности шлака среднее фактическое и равновесное содержание фосфора в полупродукте снижается. Разброс показателей с фактическим содержанием фосфора в металле связан с нестабильностью шлакового расплава и протеканием процесса рефосфорации.

На рис. 3.55 представлен коэффициент распределения фосфора между шлаком и металлом в зависимости от основности шлака.



Рис. 3.55. Коэффициент распределения фосфора между шлаком и металлом при изменении основности шлака.

Из представленных на рис. 3.55 данных видно, что 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. Степень достижения равновесия при средней основности шлака 1,0 и 3,0 соответственно равна:

$$\alpha (1) = 10/15 = 0,67; \alpha (3) = 30 /100 = 0,3.$$

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. Учитывая это, а также увеличение расхода электроэнергии для расплавления извести, то нет необходимости вести процесс дефосфорации при высокой основности шлака.

Из представленных выше данных видно, что в анализируемом массиве плавов каждый оцениваемый параметр (содержание FeO в шлаке, основность шлака, температура расплава) оказывает влияние на распределение фосфора между шлаком и металлом и характер распределения фосфора соответствует закону термодинамики.

Также был проведен анализ коэффициента распределения фосфора между шлаком и металлом при использовании 100% лома. Анализировали изменение коэффициента распределения фосфора в зависимости от содержания FeO в шлаке, температуры полупродукта и основности шлака.

На рис. 3.56 представлен коэффициент распределения фосфора между шлаком и металлом в зависимости от содержания FeO в шлаке при использовании в завалке 100% металлического лома.



Рис. 3.56. Коэффициент распределения фосфора между шлаком и металлом при изменении содержания FeO в шлаке (при работе на 100 % ломе в завалке).

При увеличении содержания FeO в шлаке фактический и равновесный коэффициент распределения фосфора между шлаком и металлом увеличивается. Из представленных на рис. 3.56 данных видно, что распределение фосфора между шлаком и металлом при увеличении содержания FeO в шлаке подчиняется законам термодинамики.

На рис. 3.57 представлен коэффициент распределения фосфора между шлаком и металлом в зависимости от температуры полупродукта перед выпуском из печи при выплавке полупродукта с использованием 100% лома.

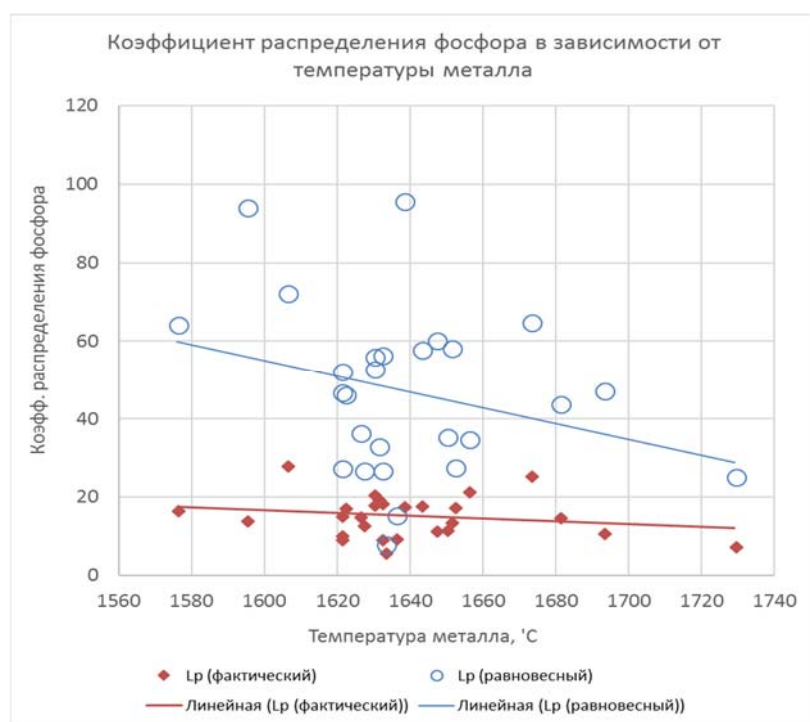


Рис. 3.57. Коеэффициент распределения фосфора между шлаком и металлом при изменении температуры металла на выпуске (при работе на 100% ломе в завалке).

При увеличении температуры полупродукта на выпуске фактический и равновесный коеэффициент распределения фосфора между шлаком и металлом снижается.

На рис. 3.58 представлен коеэффициент распределения фосфора между шлаком и металлом в зависимости от основности шлака.

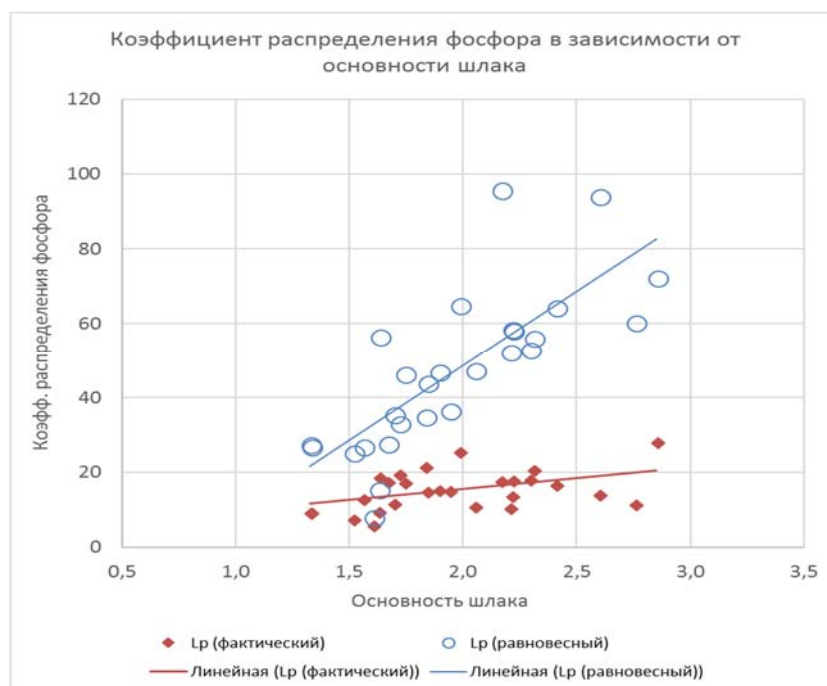


Рис. 3.58. Коеэффициент распределения фосфора между шлаком и металлом при изменении основности шлака (при работе на 100 % ломе в завалке).

При увеличении температуры полупродукта на выпуске фактический и равновесный коэффициент распределения фосфора между шлаком и металлом увеличивается. Из представленных на рис. 3.58 данных видно, что 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.

Приведенные графики показывают, что в присутствии ГБЖ окисленность и основность шлака, а также температура металла влияют на распределение фосфора в шлаке и металле таким же образом, как и в случае выплавки полупродукта с использованием 100% металлического лома.

На рис. 3.59 показано содержание серы в зависимости от доли ГБЖ в шихте.

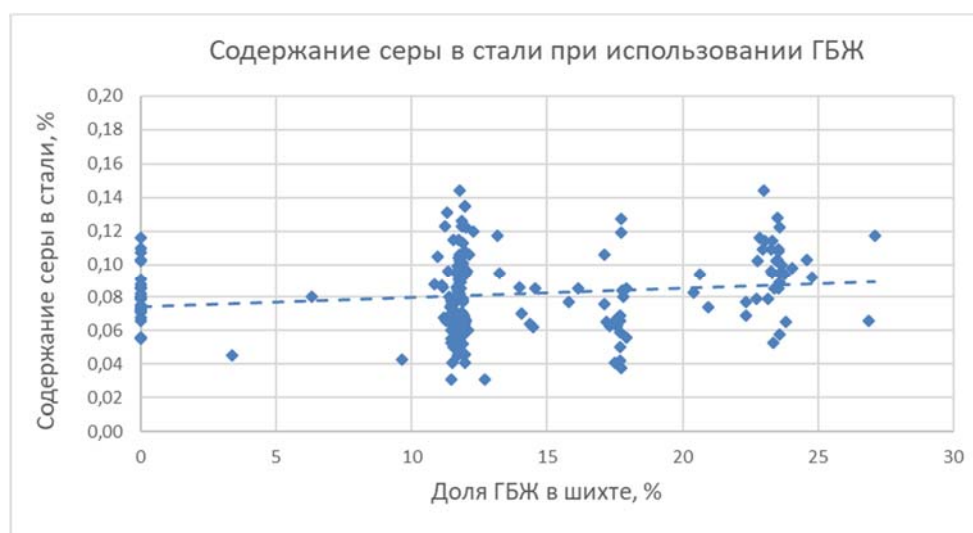


Рис. 3.59. Содержание серы в стали в зависимости от доли ГБЖ в шихте.

Из рисунка 3.59 видно, что при увеличении доли ГБЖ в шихте с 0 до 27% среднее содержание серы в металле, несмотря на ее низкое содержание в ГБЖ, незначительно увеличивается с 0,074% до 0,088%. Это связано с тем, что при повышении доли ГБЖ в шихте увеличивали количество отдаваемых углеродсодержащих материалов, в которых присутствует значительное количество серы.

Также в условиях выплавки стали в ДСП-150 в ЭСПЦ ТАГМЕТ проводили анализ влияния доли ГБЖ в шихте на содержание азота, фосфора и серы. Для анализа использовали плавки текущего сортамента (трубных марок сталей). Отбор проб для проведения химического анализа стали проводили перед выпуском плавки из печи.

Построены диаграммы, показывающие изменение содержания примесей в получаемом полупродукте в зависимости от доли ГБЖ.



Рис. 3.60. Содержание азота в стали в зависимости от доли ГБЖ в шихте (107 плавов).

Из рисунка 3.60 видно, 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, также связано с увеличением количества образующегося оксида углерода, обусловленного повышением расхода углеродсодержащих материалов при повышенном содержании оксидов железа. При расчете текущей равновесной концентрации азота при обезуглероживании используют формулу Геллера:

$$[N]_к = (28 * \Delta C / (12 * P_{общ} * K^2_{N_2}) + 1 / [N]_н)^{-1} \quad (3.13)$$

где ΔC – количество окисленного углерода, %;

$P_{общ}$ – общее давление газа в системе;

$K^2_{N_2}$ – константа равновесия реакции растворения азота в жидком железе;

$[N]_н$ – начальное содержание азота в металле.

Снижение содержания азота в стали при увеличении доли металлизированного сырья в шихте также отмечено в работах [130, 184, 192].



Рис. 3.61. Содержание серы в стали в зависимости от доли ГБЖ в шихте (107 плавов).

Среднее содержание серы в металле уменьшается с 0,0073% до 0,0024% при увеличении доли ГБЖ в шихте с 0 до 36% (рис.3.61).

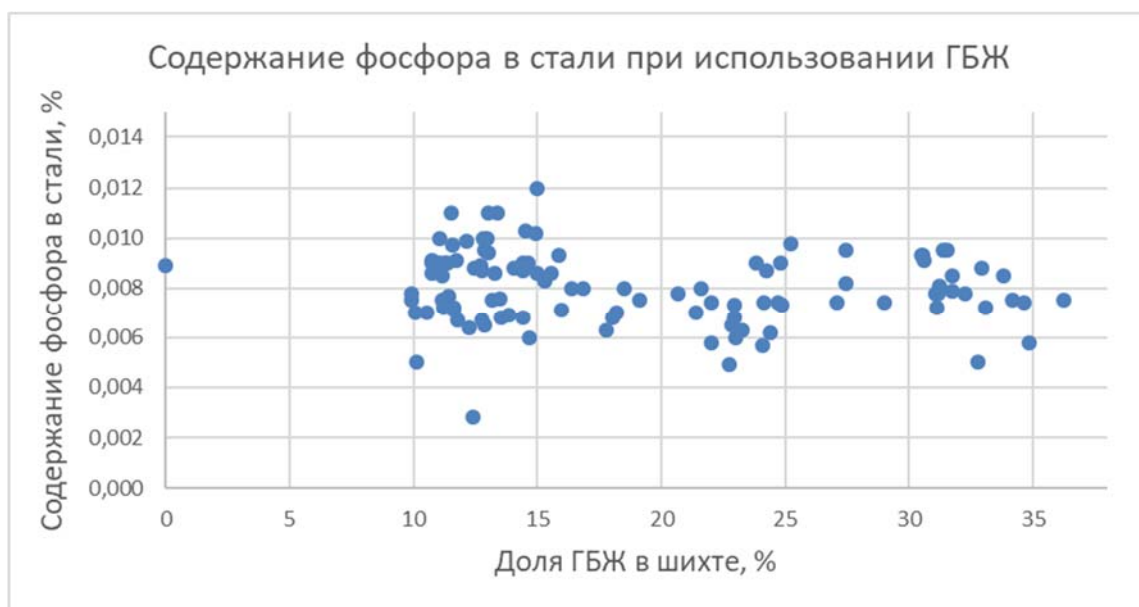


Рис. 3.62. Содержание фосфора в стали в зависимости от доли ГБЖ в шихте (107 плавов).

При увеличении доли ГБЖ в шихте с 0 до 36% (рис.3.62) содержание фосфора в металле находилось примерно на одном уровне. При этом средний удельный расход извести при увеличении добавки ГБЖ находился примерно на одном уровне, и, соответственно основность шлака при увеличении добавки ГБЖ снижалась.

3.4.2. Анализ влияния ГБЖ на содержание примесей цветных металлов

Ниже приведен анализ влияния ГБЖ на содержание примесей цветных металлов в полупродукте в условиях выплавки стали в ДСП-150 в ЭСПЦ ВТЗ. Для анализа использовали массив, состоящий из 209 плавок, отобранный случайным образом из текущего производимого сортамента. Построены диаграммы, показывающие влияние доли ГБЖ на содержание примесей в стали, которые представлены на рисунках ниже.

При увеличении доли ГБЖ в шихте с 0 до 27% среднее содержание меди в металле уменьшается с 0,21% до 0,155% (рис.3.63). На графике построена линейная регрессионная линия, показаны интервалы с доверительной вероятностью 95%, коэффициент корреляции и уровень значимости. Коэффициент корреляции (r) составляет -0,5811, это означает, что имеется зависимость между фактором и откликом (при $0,25 < r < 0,75$ связь умеренная).

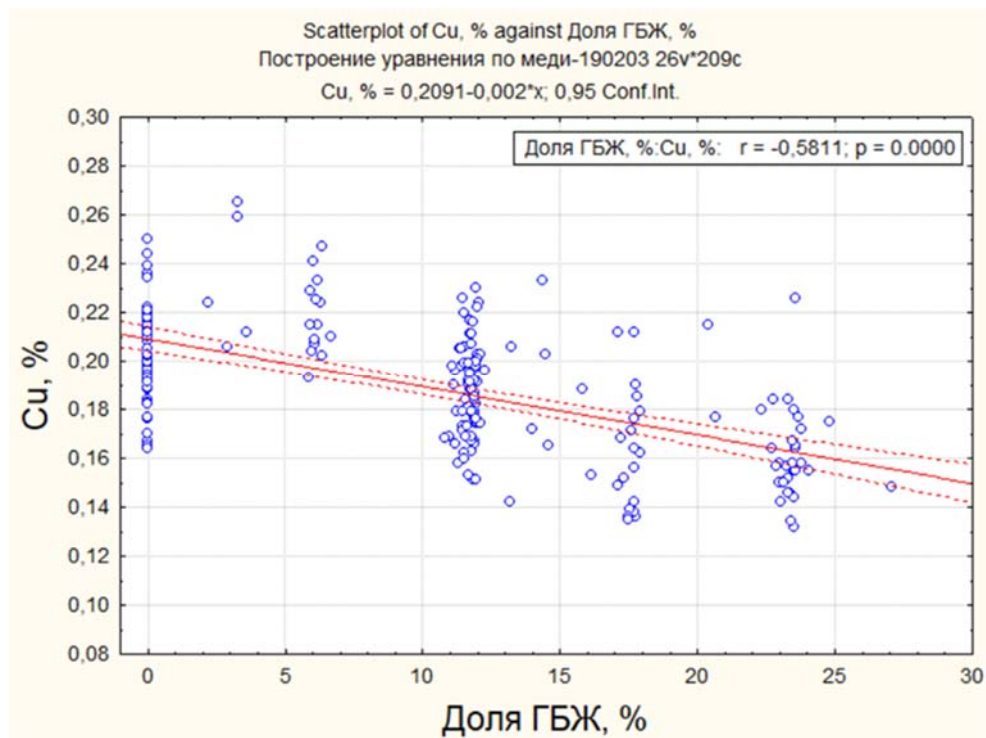


Рис. 3.63. Содержание меди в стали в зависимости от доли ГБЖ в шихте.

Разброс данных обусловлен использованием разных сортов лома и не стабильным содержанием в нем меди.

Далее была проведена проверка на нормальность распределения данных по параметру содержание меди. Построена частотная гистограмма. Результаты анализа показывают, что распределение относительно нормальное (уровень значимости больше 0,05). На диаграмме показано количество значений, используемых для анализа, среднее, минимальное и максимальное, а также стандартное отклонение. Нормально-

вероятностный график существенных отклонений от теоретической нормальной прямой не показывает. На ящичной диаграмме среднее значение находится по центру (рис.3.64).

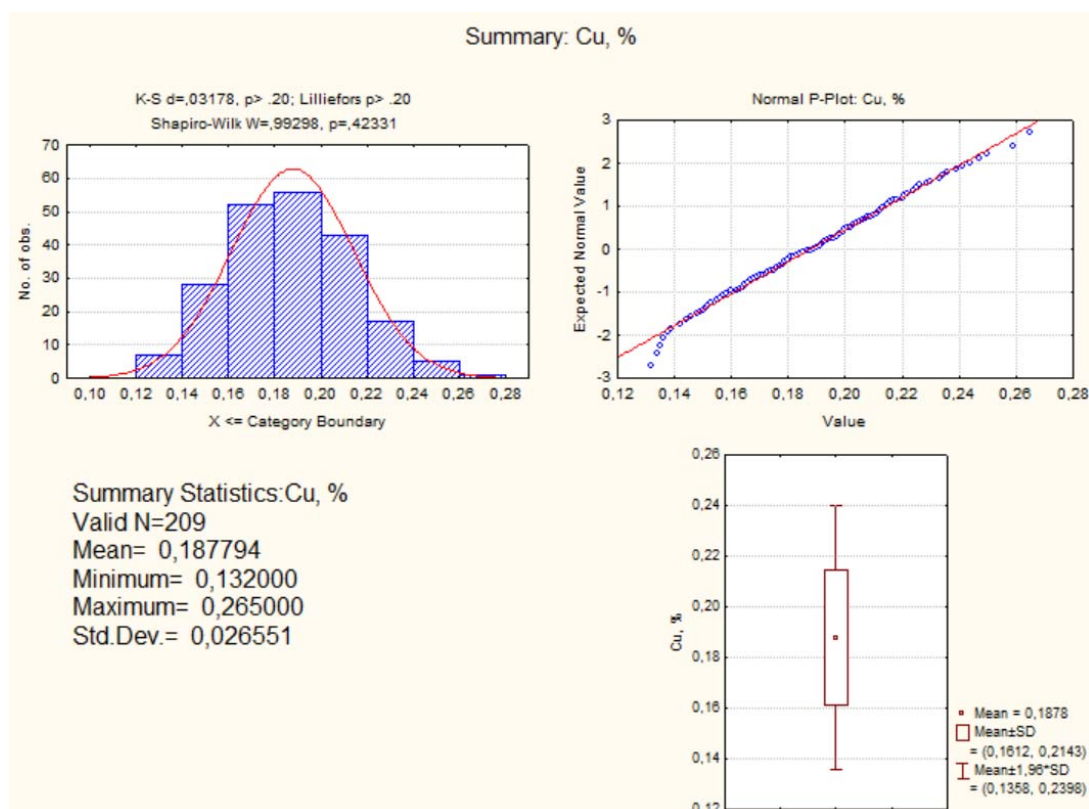


Рис. 3.64. Нормальность распределения меди, нормально-вероятностный график, ящичная диаграмма.

Также провели анализ содержание олова, никеля и хрома в полупродукте в зависимости от доли ГБЖ в шихте. Наблюдается тенденция снижения данных примесей при увеличении доли ГБЖ. Данные представлены на рисунках ниже.

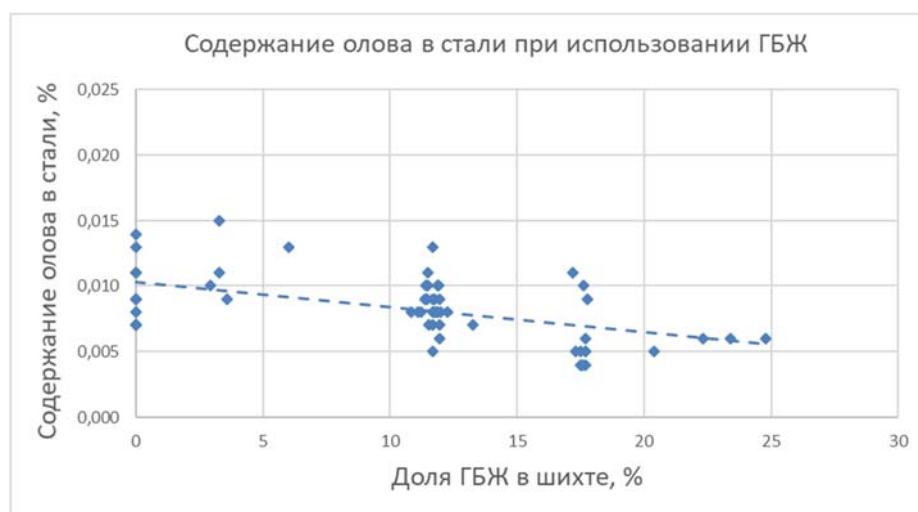


Рис. 3.65. Содержание олова в стали в зависимости от доли ГБЖ в шихте.

Из рисунка 3.65 видно, что при увеличении доли ГБЖ в шихте с 0 до 25% среднее содержание олова в металле снижается с 0,010% до 0,005%.

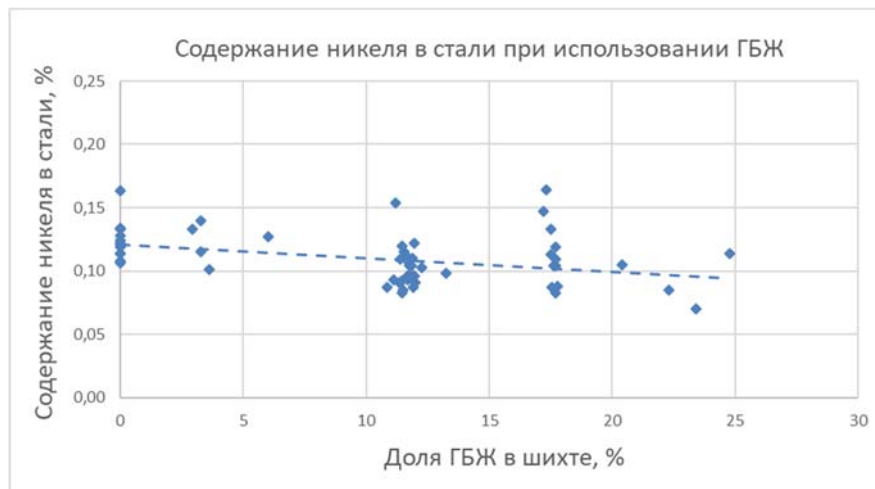


Рис. 3.66. Содержание никеля в стали в зависимости от доли ГБЖ в шихте.

Из рисунка 3.66 видно, что при увеличении доли ГБЖ в шихте с 0 до 25% среднее содержание никеля в металле снижается с 0,12% до 0,09%.

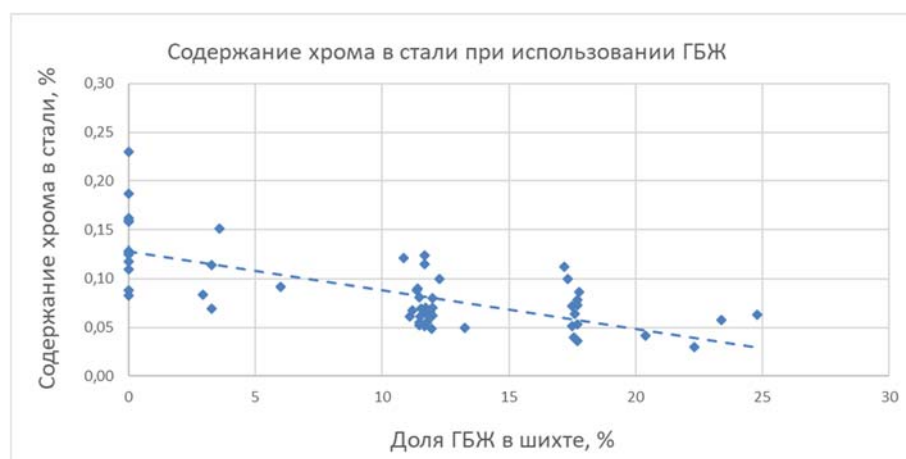


Рис. 3.67. Содержание хрома в стали в зависимости от доли ГБЖ в шихте.

Из рисунка 3.67 видно, что при увеличении доли ГБЖ в шихте с 0 до 25% среднее содержание хрома в металле снижается с 0,13% до 0,03%.

Оценка содержания суммарного количества примесей цветных металлов в полупродукте в зависимости от доли ГБЖ на плавках, проведенных в ДСП-150 ВТЗ, показывает, что при увеличении доли ГБЖ с 0 до 25% общее количество примесей снижается в среднем с 0,46% до 0,31% (рис.3.68). При анализе были исключены плавки легированные никелем и хромом. Разброс данных обусловлен колебанием примесей цветных металлов в используемом металлическом ломе.

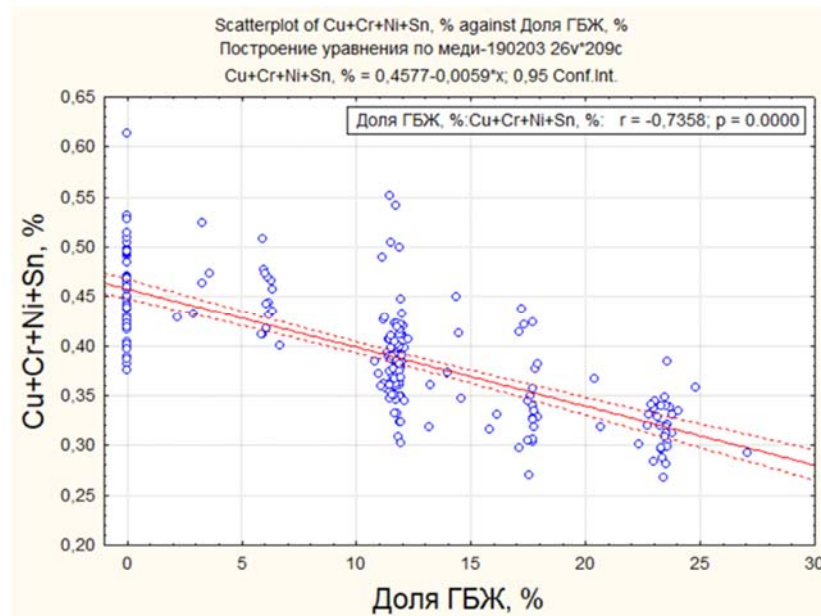


Рис. 3.68. Общее содержание примесей цветных металлов в стали в зависимости от доли ГБЖ в шихте.

Также в условиях ЭСПЦ ТАГМЕТ проводили анализ влияния доли ГБЖ в шихте на содержание примесей цветных металлов (меди, олова, хрома, никеля, сурьмы и кобальта) в полупродукте при выплавке стали в ДСП-150. Для анализа использовали плавки (массив из 55 плавков) текущего сортамента (трубных марок сталей). Отбор проб для проведения химического анализа стали проводили перед выпуском плавки из печи. Построены диаграммы, показывающие изменение содержания примесей в получаемом полупродукте в зависимости от доли ГБЖ и показаны аппроксимирующие кривые (рис. 3.69-3.74).



Рис. 3.69. Содержание меди в стали в зависимости от доли ГБЖ в шихте (52 плавки).

Среднее содержание меди в металле уменьшается с 0,22% до 0,13% при увеличении доли ГБЖ в шихте с 10 до 20%. Содержание меди в завалке, состоящей из металлического лома не стабильное и обычно принимается на уровне 0,25%.



Рис. 3.70. Содержание олова в стали в зависимости от доли ГБЖ в шихте (52 плавки).

Среднее содержание олова в металле уменьшается с 0,014% до 0,011% при увеличении доли ГБЖ в шихте с 10 до 20%.



Рис. 3.71. Содержание хрома в стали в зависимости от доли ГБЖ в шихте (52 плавки).

Среднее содержание хрома в металле уменьшается с 0,066% до 0,028% при увеличении доли ГБЖ в шихте с 10 до 20%.

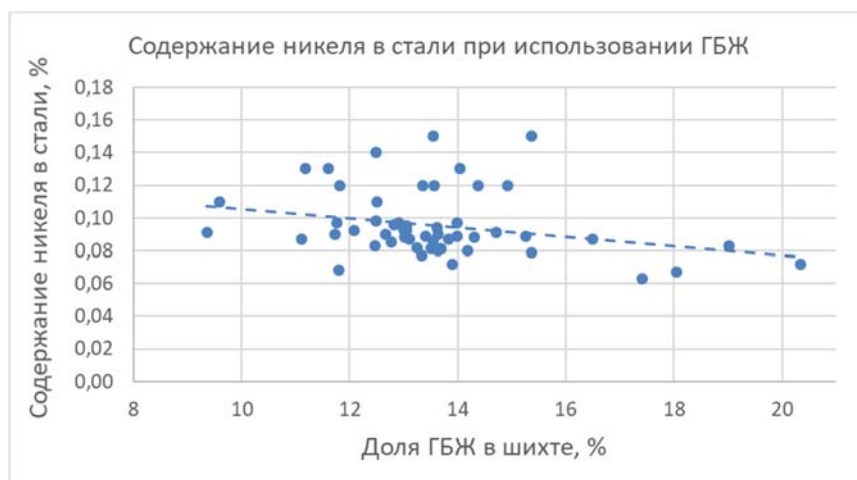


Рис. 3.72. Содержание никеля в стали в зависимости от доли ГБЖ в шихте (52 плавки).

Среднее содержание никеля в металле уменьшается с 0,11% до 0,08% при увеличении доли ГБЖ в шихте с 10 до 20%.

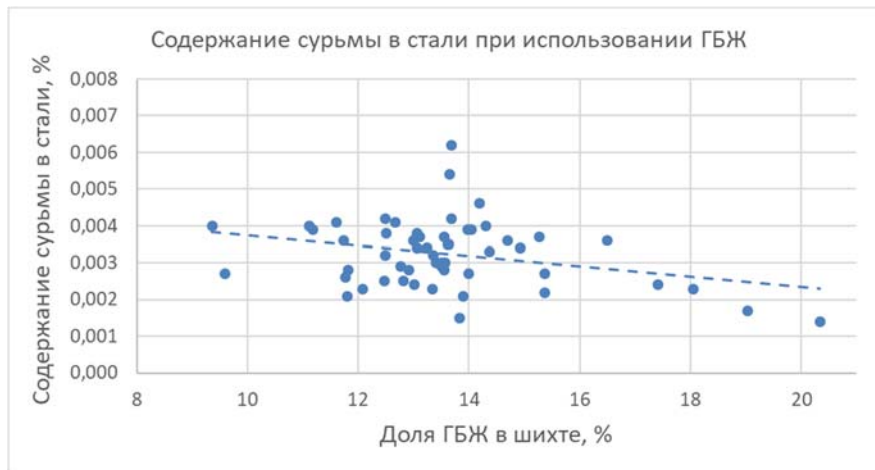


Рис. 3.73. Содержание сурьмы в стали в зависимости от доли ГБЖ в шихте (52 плавки).

Среднее содержание сурьмы в металле уменьшается с 0,0037% до 0,0023% при увеличении доли ГБЖ в шихте с 10 до 20%.

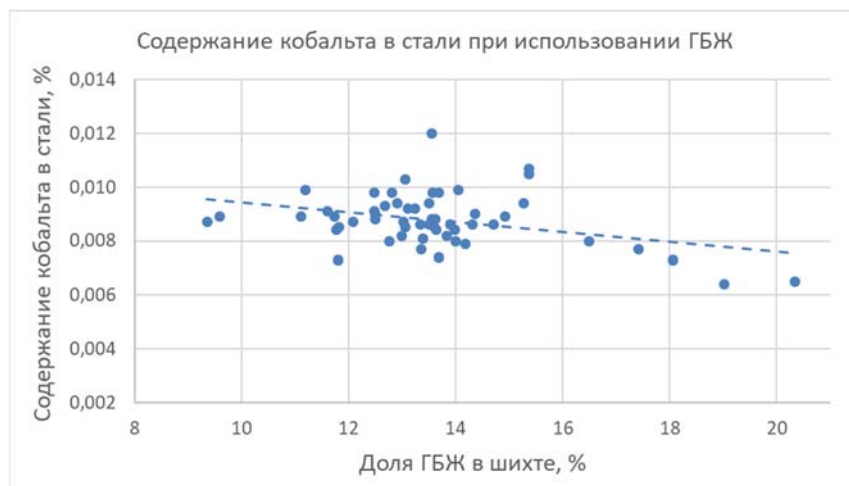


Рис. 3.74. Содержание кобальта в стали в зависимости от доли ГБЖ в шихте (52 плавки).

Среднее содержание кобальта в металле уменьшается с 0,0094% до 0,0076% при увеличении доли ГБЖ в шихте с 10 до 20%.

Из представленных данных видно, что при увеличении доли ГБЖ в шихте происходит снижение содержания примесей цветных металлов в выплавляемом полупродукте, а также снижение содержания азота, фосфора и серы. Точно известный однородный химический состав ГБЖ с относительно низким содержанием вредных примесей позволяет производить “чистый” по примесям металл и повысить вероятность попадания в заданную марку стали, снижая уровень брака.

3.4.3. Прогноз содержания меди в полупродукте при разной доле ГБЖ в шихте. Построение регрессионного уравнения.

Учитывая тот факт, что компоновка лома совместно с ГБЖ ведется с учетом ограничения содержания меди в полупродукте, а также учитывая большой разброс показателей, обусловленный колебанием примесей в металлическом ломе была предложена методика оценки плотности распределения примесей цветных металлов (на примере меди) в полупродукте в зависимости от доли ГБЖ в шихте. Для построения графиков использовали функции нормального распределения примесей в исходных шихтовых материалах. Анализ данных проводили с использованием массива, состоящего из 209 плавок, произведенных в ДСП-150 ВТЗ.

На графиках на рис. 3.75 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.

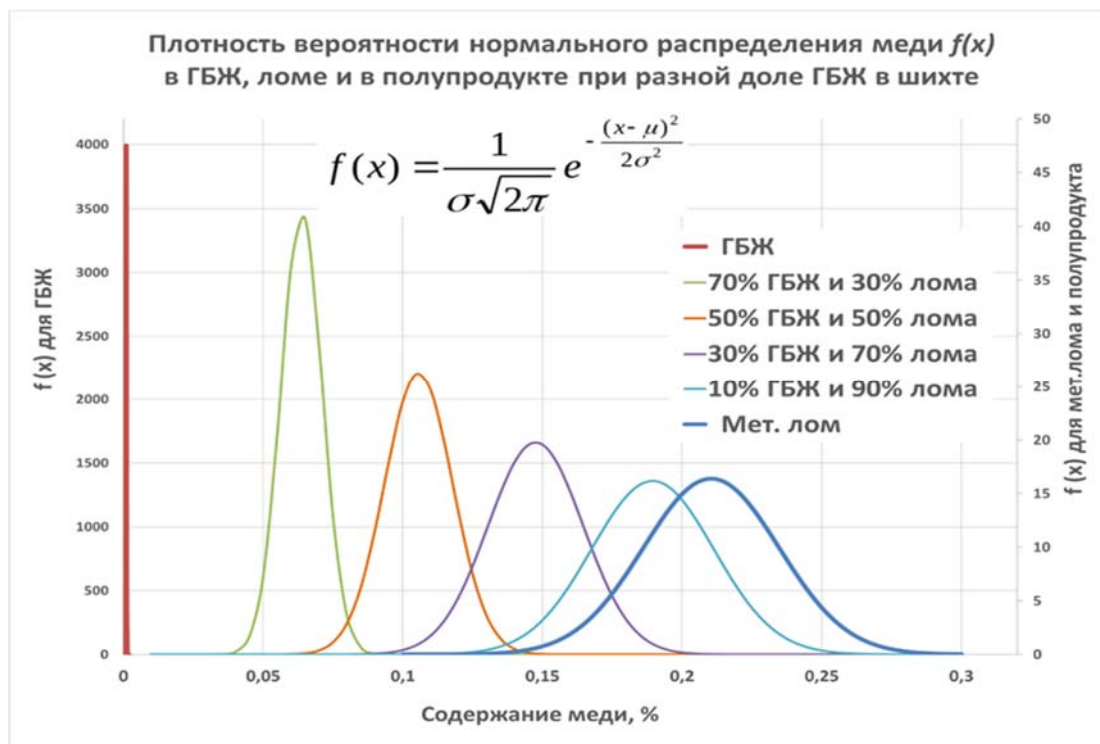


Рис. 3.75 Плотность вероятности нормального распределения меди в полупродукте при разной доле ГБЖ в шихте.

Для построения графиков распределения меди в шихте и в полупродукте использовали функцию распределения Гаусса:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.14)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение распределения, %;

μ – математическое ожидание (среднее значение), %;

x – содержание меди, %.

При построении графика нормального распределения меди в ГБЖ приняли, что среднее содержание меди в ГБЖ составляет 0,001 %, а его среднеквадратическое отклонение 0,0001 %.

Для построения графика нормального распределения меди в металлическом ломе (сумме разных видов лома) сначала определили ее среднее значение и среднеквадратическое отклонение. Используя имеющийся массив плавок (содержащий массы шихтовых материалов и полупродукта, а также концентрацию меди в полупродукте), для каждой плавки рассчитали содержание меди в металлическом ломе, который состоит из суммы различных видов лома. Приняв, что содержание меди в ГБЖ равно 0,001 % и его стандартное отклонение близко к нулю, вычислили содержание меди в металлическом ломе как разницу между количеством меди в полупродукте и ГБЖ с учетом выхода годного.

Используя программный пакет STATISTICA полученные данные с расчетным содержанием меди в ломе отображали в виде гистограммы с частотным распределением меди в металлическом ломе. По форме гистограммы достаточно хорошо описываются теоретической кривой Гаусса (рис. 3.76), параметры которой использовали для построения плотности вероятности распределения меди в металлическом ломе.

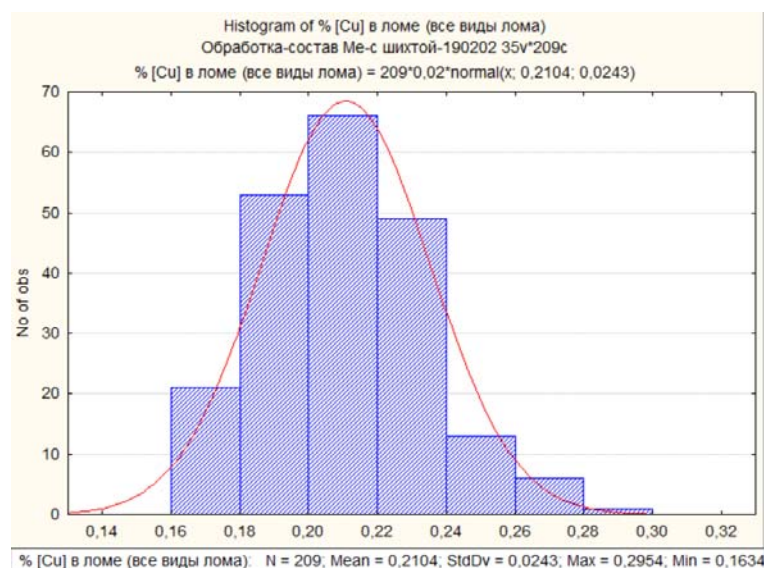


Рис. 3.76. Диаграмма нормального распределения меди в металлическом ломе.

Среднее содержание меди в металлическом ломе равно 0,2104%, среднеквадратическое отклонение 0,0243%. При этом металлический лом состоит из разных видов лома, средняя доля каждого представлена в табл.3.6.

Табл.3.6. Средняя доля каждого вида лома, используемого в выборке, %.

2А	6А	Т2А	25А	3АН	3АО	9А	16А	3А ЖДЛ	3А	3А ТЭСЦ	ЧУГУН	12А	Всего
7,50	1,03	1,44	0,68	53,89	7,96	2,72	2,23	0,85	20,02	0,25	0,06	1,36	100

Далее, для построения графиков распределения меди в полупродукте при использовании функции распределения Гаусса принимали следующее:

1) среднее значение меди в полупродукте рассчитывали с учетом доли ГБЖ и лома по уравнению:

$$\mu = A * \mu_1 + (1-A) * \mu_2 \quad (3.15)$$

где А и (1-А) –доля ГБЖ и лома;

μ_1, μ_2 – среднее значение меди в ГБЖ и ломе.

2) рассеивание значений случайной величины относительно ее математического ожидания при изменении соотношения ГБЖ и лома в полупродукте изменяется по такой же зависимости, как и среднее значение, поэтому среднеквадратическое отклонение в полупродукте рассчитывали по такому же принципу:

$$\sigma = A * \sigma_1 + (1-A) * \sigma_2 \quad (3.16)$$

3) с учетом выхода годного и рассчитанных параметров построили графики нормального распределения меди в полупродукте при разной доле ГБЖ в шихте.

При построении графиков распределения меди в шихте и в полупродукте приняли следующие допущения:

1) при уменьшении общего количества лома доля его каждого вида не изменяется.

2) при расчете функции распределения меди в полупродукте использовали формулу, учитывающую выход годного в зависимости от доли ГБЖ в шихте:

$$ВГ, \% = 90,7193 - 0,2073 * X \quad (3.17)$$

где X – доля ГБЖ, %.

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

Для прогнозирования содержания меди в полупродукте при использовании различного вида металлошихты, в том числе ГБЖ и построения регрессионного уравнения на примере массива плавок, произведенных в ДСП-150 ВТЗ, провели множественный корреляционный и регрессионный анализ с использованием компьютерной программы STATISTICA.

Для изучения корреляционной зависимости построили матрицу линейных коэффициентов парной корреляции анализируемых параметров чтобы произвести отбор факторов, включаемых в модель зависимости (табл. 3.7). Данная матрица, при построении многофакторной модели, позволяет проанализировать признаки-факторы на мультиколлинеарность (отсутствие коррелированности между ними). Коэффициенты, выделенные в таблице красным цветом, означают наличие связи между представленными видами металлошихты.

Таблица 3.7. Линейные коэффициенты парной корреляции разных видов металлошихты.

Correlations (Обработка-состав Ме-с шихтой-190127)															
Marked correlations are significant at p < .05000															
N=209 (Casewise deletion of missing data)															
Variable	Means	Std. Dev.	2A	6A	T2A	25A	ГБЖ	3АН	3АО	9А	16А	3АЖД	3А	3А ТЭСЦ	Чугун
2A	6.69106	2.63757	1.000000	-0.073718	-0.097511	-0.108570	-0.420160	0.253198	0.026776	0.283538	-0.095867	-0.616109	-0.153097	-0.507196	-0.176319
6A	0.92050	1.33575	-0.073718	1.000000	0.124526	0.614143	-0.186951	0.196412	0.295141	0.219709	0.421816	-0.117910	-0.305858	-0.137779	-0.047897
T2A	1.28530	0.93102	-0.097511	0.124526	1.000000	0.190404	0.142000	-0.028921	-0.130871	0.205295	-0.093824	-0.350072	-0.049558	0.371555	-0.095953
25A	0.61064	0.90053	-0.108570	0.614143	0.190404	1.000000	-0.429987	0.366852	0.295710	0.121900	0.659373	-0.169796	-0.412153	-0.038824	-0.047130
ГБЖ	10.77197	7.78419	-0.420160	-0.186951	0.142000	-0.429987	1.000000	-0.545796	-0.451372	0.008502	-0.525743	0.280278	0.394953	0.247924	0.112736
3АН	48.08549	21.87684	0.253198	0.196412	-0.028921	0.366852	-0.545796	1.000000	0.138489	-0.092505	0.343663	-0.151871	-0.942734	-0.259687	-0.073577
3АО	7.09860	5.58576	0.026776	0.295141	-0.130871	0.295710	-0.451372	0.138489	1.000000	0.266939	0.173436	0.003970	-0.265073	-0.254083	-0.088328
9А	2.42844	1.85633	0.283538	0.219709	0.205295	0.121900	0.008502	-0.092505	0.266939	1.000000	-0.046311	-0.368045	-0.077747	-0.261552	-0.090925
16А	1.98731	1.74864	-0.095867	0.421816	-0.093824	0.659373	-0.525743	0.343663	0.173436	-0.046311	1.000000	-0.039703	-0.304970	0.018096	-0.001879
3АЖД	0.75921	2.71153	-0.616109	-0.117910	-0.350072	-0.169796	0.280278	-0.151871	0.003970	-0.368045	-0.039703	1.000000	0.071904	-0.055980	0.431109
3А	17.86464	20.57390	-0.153097	-0.305858	-0.049558	-0.412153	0.394953	-0.942734	-0.265073	-0.077747	-0.304970	0.071904	1.000000	0.297021	0.008962
3А ТЭСЦ	0.22493	1.13042	-0.507196	-0.137779	0.371555	-0.038824	0.247924	-0.259687	-0.254083	-0.261552	0.018096	-0.055980	0.297021	1.000000	-0.013830
Чугун	0.05569	0.80517	-0.176319	-0.047897	-0.095953	-0.047130	0.112736	-0.073577	-0.088328	-0.090925	-0.001879	0.431109	0.008962	-0.013830	1.000000
12А	1.21548	2.63816	0.154802	-0.242811	0.248701	-0.114019	-0.023648	0.036068	-0.268955	0.119471	-0.194117	-0.129622	-0.065824	-0.092116	-0.032023

Показателем тесноты связи, устанавливаемой между результативным и двумя и более факторными признаками, является совокупный коэффициент множественной корреляции (R). Данные регрессионного анализа для зависимых переменных и совокупный коэффициент множественной корреляции представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8. Регрессионный анализ для зависимых переменных.

Regression Summary for Dependent Variable: Cu, % (Обработка-состав Ме-с шихтой-190127)						
R= .71900734 R²= .51697155 Adjusted R²= .48476966						
F(13,195)=16.054 p<0.0000 Std. Error of estimate: .01906						
N=209	Beta	Std. Err. of Beta	B	Std. Err. of B	t(195)	p-level
Intercept			0.025171	0.193178	0.13030	0.896462
2A	0.507657	0.244581	0.005110	0.002462	2.07562	0.039241
6A	0.265692	0.118815	0.005281	0.002362	2.23618	0.026473
T2A	-0.183729	0.097966	-0.005240	0.002794	-1.87544	0.062227
25A	0.412777	0.113612	0.012170	0.003350	3.63320	0.000358
ГБЖ	0.022909	0.566764	0.000078	0.001933	0.04042	0.967799
3АН	1.253790	1.567695	0.001522	0.001903	0.79977	0.424819
3АО	0.291017	0.400296	0.001383	0.001903	0.72700	0.468095
9А	0.203704	0.155977	0.002914	0.002231	1.30599	0.193096
16А	-0.048080	0.150076	-0.000730	0.002279	-0.32037	0.749031
3АЖД	0.218571	0.259379	0.002140	0.002540	0.84267	0.400446
3А	1.250327	1.474647	0.001614	0.001903	0.84788	0.397543
3А ТЭСЦ	0.394375	0.128780	0.009263	0.003025	3.06239	0.002506
12А	0.072202	0.197695	0.000727	0.001990	0.36522	0.715344

Далее провели многошаговый регрессионный анализ, который заключается в том, что после оценки значимости всех коэффициентов регрессии из модели исключают тот фактор, коэффициент (p-level) при котором незначим и имеет наименьшее значение критерия. Факторы, у которых $p\text{-level} > 0,05$ были последовательно исключены из анализа, и итоговая таблица со значимыми факторами приняла следующий вид (табл. 3.9).

Таблица 3.9. Регрессионный анализ для зависимых переменных.

Regression Summary for Dependent Variable: Cu, % (Обработка-состав Ме-с шихтой-190127)						
R= ,70394770 R²= ,49554236 Adjusted R²= ,47536405						
F(8,200)=24,558 p<0,0000 Std. Error of estimate: ,01923						
N=209	Beta	Std. Err. of Beta	B	Std. Err. of B	t(200)	p-level
Intercept			0,088547	0,016571	5,34350	0,000000
2A	0,433610	0,068308	0,004365	0,000688	6,34783	0,000000
6A	0,205922	0,067408	0,004093	0,001340	3,05487	0,002558
T2A	-0,193658	0,062696	-0,005523	0,001788	-3,08885	0,002295
25A	0,375772	0,071353	0,011079	0,002104	5,26642	0,000000
3AH	0,691545	0,200011	0,000839	0,000243	3,45753	0,000666
3AO	0,245406	0,060102	0,001166	0,000286	4,08313	0,000064
3A	0,714107	0,204151	0,000922	0,000263	3,49794	0,000578
3A ТЭСЦ	0,285151	0,072464	0,006697	0,001702	3,93508	0,000115

Совокупный коэффициент множественной детерминации равен 0,47536405. Это означает, что полученная модель должна работать ($R^2 > 0,3$).

Для прогноза содержания меди с учетом полученной модели построим уравнение:

$$\begin{aligned} \text{Cu, \%} = & 0,088547(+/-0,016571) + 0,004365(+/-0,000688) \cdot (2A) + \\ & + 0,004093(+/-0,001340) \cdot (6A) - 0,005523(+/-0,001788) \cdot (T2A) + \\ & + 0,011079(+/-0,002104) \cdot (25A) + 0,000839(+/-0,000243) \cdot (3AH) + \\ & + 0,001166(+/-0,000286) \cdot (3AO) + 0,000922(+/-0,000263) \cdot (3A) + \\ & + 0,006697(+/-0,001702) \cdot (3A \text{ ТЭСЦ}) \end{aligned} \quad (3.18)$$

где 2A, 6A, T2A и тд. – количество каждого вида металлошихты.

Использование данного уравнения с определенной долей вероятности позволит прогнозировать содержание меди в полупродукте при использовании различного вида металлошихты.

Оценка приемлемости модели представлена в табл. 3.10. Анализ остатков на нормальность распределения при построении гистограмм остатков достаточно хорошо описывается кривой Гаусса.

Таблица 3.10. Оценка приемлемости модели.

Analysis of Variance; DV: Cu, % (Обработка-состав Ме-с шихтой-190127)					
Effect	Sums of Squares	df	Mean Squares	F	p-level
Regress.	0,072659	8	0,009082	24,55817	0,000000
Residual	0,073967	200	0,000370		
Total	0,146626				

Значение показателя p-level составляет менее 0,05. Это означает, что модель приемлема и ее можно использовать для прогнозирования результата (содержание меди в полупродукте) при изменении факторов (количество металлошихты разных видов).

3.5. Оценка экономической целесообразности замены металлического лома на ГБЖ

Несмотря на увеличение расходов энерготехнологических показателей плавки и снижение стойкости футеровки печи, помимо получения чистого по ряду примесей металла, использование добавки ГБЖ в шихте все равно остается экономически привлекательно при замене им дорогостоящих видов металлошихты.

Ниже приведена приблизительная экономическая оценка замены стального лома типа ЗАЖД и передельного чугуна на ГБЖ в завалке. Для расчета были использованы данные по расходам основных энергоресурсов и добавочных материалов при выплавке стали с использованием ГБЖ (массив из 201 плавки) и работе на 100 % ломе (массив из 49 плавки). Расчет приведен в долларах США с учетом стоимости приведенных ресурсов на период проведения анализируемых плавки. В таблице 3.11 показана экономическая прибыль за плавку при использовании в завалке 12,9 % ГБЖ (среднее за анализируемый период) взамен стального лома ЗАЖД и передельного чугуна при среднем весе завалки 168,5 т.

Таблица 3.11. Экономический эффект от замены ЗАЖД лома и передельного чугуна на ГБЖ в завалке за плавку.

Вид металлошихты (заменяемой)	Цена заменяемой шихты, \$/т	Приведенная цена ГБЖ*, \$/т	Разница в цене металлошихты, \$/т	Кол-во заменяемого лома, %	Кол-во заменяемого лома за плавку (при весе шихты 168,5 т), т	Экономия от замены металлошихты, \$/пл
Лом стальной ЗАЖД	275,6	248,6	27,0	12,9	21,737	586,85
Чугун передельный	391,5	248,6	142,9	12,9	21,737	3106,11

* - Цена тонны ГБЖ с учетом изменения выхода годного ($1,1416/1,0745=1,0624$ (~ 6,2%)) при степени металлизации 85%.

Из таблицы 3.11 видно, что больший экономический эффект дает замена передельного чугуна на ГБЖ в связи с высокой стоимостью чугуна.

Учитывая увеличение энергетических затрат и вспомогательных материалов при использовании ГБЖ проведем расчет основных экономических потерь за анализируемый период. В таблице 3.12 показаны экономические потери за счет увеличения расхода основных энергоресурсов и добавочных материалов для обслуживания печи при использовании 12,9 % ГБЖ (среднее за анализируемый период) в завалке и среднем весе плавки 147,5 т.

Таблица 3.12. Экономические потери при увеличении расхода основных энергоресурсов и добавочных материалов за плавку.

Вид ресурса*	Ед.изм.	Цена ресурса, \$/ед.	Расход ресурса без использования ГБЖ, ед/т	Расход ресурса при использовании ГБЖ (12,9 %), ед/т	Увеличение расхода ресурса, ед/т	Потери при увеличении расхода, \$/т	Потери при увеличении расхода ресурса, \$/плавку (при весе плавки 147,5 т)
Электроэнергия	кВт•ч	0,0410	387	426	39	1,60	235,85
Кислород	м³	0,2797	37,0	41,9	4,9	1,37	202,15
Известь	кг	0,0695	51,5	55,9	4,4	0,31	45,11
Магнезиально-известковый флюс	кг	0,1154	10,40	10,55	0,15	0,02	2,55
Подварочная (заправочная) масса	кг	0,4503	0,87	0,91	0,04	0,02	2,66
Торкрет-масса	кг	0,5287	0,272	0,301	0,029	0,02	2,26
Итого:							490,58

*- показатели расхода углеродсодержащих материалов не учтены при расчете в связи с отсутствием точных данных. По приблизительной оценке, повышение расхода углеродсодержащих материалов и других, не учтенных в данном расчете, за анализируемый период составило не более 10 %.

Из представленных таблиц 3.11 и 3.12 видно, что с учетом изменения расходов энерготехнологических показателей за анализируемый период при использовании ГБЖ (среднее содержание 12,9 %) в шихте наблюдается экономический эффект:

1) При замене ЗАЖД лома на ГБЖ эффект составляет

$$586,85 - 490,58 = 96,27 \$ \text{ за плавку,}$$

- 2) При замене передельного чугуна на ГБЖ эффект составляет
 $3106,11 - 490,58 = 2615,53$ \$ за плавку.

Важное преимущество при замене лома на ГБЖ – это высокая вероятность попадания в заданную марку стали при выплавке стали в ДСП и снижение уровня брака. При замене передельного чугуна на ГБЖ в завалке виден значительный экономический эффект, что связано с высокой стоимостью передельного чугуна относительно стоимости ГБЖ. Следует отметить, что в расчет экономических потерь не включены затраты на стойкость периклазоуглеродистой футеровки ДСП, а также дополнительные трудозатраты на промежуточные ремонты футеровки и технологические простои ДСП.

3.6. Выводы по главе 3

Анализ плавков показывает, что увеличение добавки ГБЖ приводит к повышению расхода основных энерготехнологических показателей плавки, а также к повышению расхода шлакообразующих материалов в ДСП-150, что обусловлено наличием оксидов железа в ГБЖ, на восстановление которых необходимы дополнительные энергетические затраты. Наличие пустой породы в брикетах увеличивает количество шлака в печи и снижает коэффициент электропроводности шихты, что также отражается на расходе электроэнергии. Так, 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%). Также из представленных на диаграммах данных видно, что рост основных энергетических показателей наблюдается на всех анализируемых интервалах температур полупродукта на выпуске из печи и на всех интервалах содержаний углерода в стали.

Важно отметить, что влияние ГБЖ при увеличении его доли в шихте на разных ДСП проявляет себя по-разному. В связи с этим, возникает необходимость проведения более подробного анализа влияния ГБЖ на технологические показатели плавки с целью поиска оптимального режима выплавки стали, применительно к конкретной ДСП.

В условиях ДСП-150 ВТЗ проведен анализ влияния добавки ГБЖ на содержание углерода в полупродукте и окисленность металла и шлака. 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. Показано, что содержание углерода в полупродукте, при одном и том же содержании

оксидов железа в шлаке, ниже на плавках, произведенных с использованием ГБЖ в шихте по сравнению с плавками, произведенными с использованием 100% металлического лома. Таким образом, на примере анализируемых массивов плавов показано, что добавка ГБЖ в шихту позволяет достигать более низких значений содержания углерода за одно и то же время плавки, что открывает возможность снижения длительности плавки, расхода кислорода и увеличения производительности ДСП.

Проведено исследование выплавки полупродукта в ДСП-150, имеющей порционную загрузку твердой завалки. 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. 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.

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. Искусственное создание такого гарнисажного слоя позволит защитить футеровку печи, повысить ее стойкость и снизить расход огнеупорных материалов для ее обслуживания.

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 кластеров в ванне ДСП, состоящих преимущественно из ГБЖ и предотвратить образование тугоплавких конгломератов в ванне печи, избежать образования крупных настывов на

стенах футеровки и водоохлаждаемых панелях печи, а также предотвратить локальные перегревы рабочего слоя футеровки.

На примере анализа существующих массивов плавов было показано, что применение добавки ГБЖ в завалке при выплавке стали в ДСП-150, позволяет получать полупродукт с пониженным содержанием фосфора. Например, в условиях выплавки стали в ДСП-150 ВТЗ при поддержании основности шлака на одном уровне при увеличении доли ГБЖ в шихте с 0 до 27 % отмечено снижение фосфора с 0,012 до 0,006 % (в 2 раза). Снижение концентрации фосфора в металле при увеличении доли ГБЖ в шихте обусловлено чистотой ГБЖ по фосфору, а также протеканием процесса дефосфорации в условиях повышенной окисленности системы металл-шлак при увеличении доли ГБЖ.

При увеличении доли ГБЖ в шихте с 0 до 25 % фактический коэффициент распределения фосфора между шлаком и металлом возрастает с 16 до 25, равновесный коэффициент возрастает с 43 до 67. Но учитывая разброс показателей процесс распределения фосфора при увеличении доли ГБЖ становится менее стабильный. Разброс данных связан с нестабильностью шлакового режима, обусловленным повышенным количеством образующегося шлака, малым временем его формирования, изменением его вязкости в связи с добавкой извести для поддержания заданной основности и с ограниченным временем плавления добавок извести и флюса. В целом характер протекания процесса дефосфорации подчиняется законам термодинамики. Закономерности протекания процесса дефосфорации при использовании ГБЖ в шихте соответствуют процессам дефосфорации, протекающих при работе ДСП на 100 % металлическом ломе.

Увеличение добавки ГБЖ в завалке при выплавке стали в ДСП-150 позволяет получать полупродукт с пониженным содержанием примесей цветных металлов, таких как медь, никель, хром, олово и др. Это связано с чистотой ГБЖ по данным примесям. Благодаря точно известному однородному химическому составу ГБЖ появляется возможность повышения вероятности попадания в заданную марку стали и снижения уровня брака при производстве полупродукта.

Для анализа изменения содержания примесей цветных металлов в получаемом полупродукте при увеличении доли ГБЖ в шихте были построены диаграммы с аппроксимирующими графиками. Для построения диаграмм использовали программный пакет STATISTICA и Microsoft Excel. Разброс данных обусловлен колебанием примесей цветных металлов в используемом металлическом ломе.

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. На примере анализируемого массива плавов в ДСП-150 проведен множественный корреляционный анализ влияния разных видов металлошихты на содержание меди в полупродукте. Предложена регрессионная модель, позволяющая прогнозировать содержание меди при изменении добавки разных видов металлошихты.

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 связи с этим также была приведена приблизительная экономическая оценка замены металлического лома на ГБЖ при выплавке стали в ДСП-150. Относительно низкая стоимость ГБЖ, по сравнению с передельным чугуном и дорогостоящим видом лома, делает привлекательным его использование в качестве шихтового материала даже несмотря на увеличение расходов энерготехнологических показателей плавки и снижение стойкости рабочей футеровки печи. Большой экономический эффект дает замена передельного чугуна на ГБЖ в связи с высокой стоимостью данного сырья. На примере анализируемого массива плавов с использованием ГБЖ в шихте (среднее содержание 12,9 %) в условиях выплавки стали в ДСП-150 показан приблизительный экономический эффект, который составил при замене ЗАЖД лома на ГБЖ - 96\$ за плавку, при замене передельного чугуна на ГБЖ - 2616\$ за плавку.

4. АНАЛИЗ ИЗНОСА ФУТЕРОВКИ ДСП ПРИ ПОВЫШЕНИИ ДОЛИ ГБЖ В ШИХТЕ

4.1. Оценка стойкости футеровки и расхода огнеупорных масс для ее обслуживания при использовании ГБЖ

Влияние добавки ГБЖ значительным образом отражается на стойкости футеровки ДСП. Анализ стойкости рабочей футеровки и расхода вспомогательных материалов для ее обслуживания проводили в условиях ЭСПЦ ВТЗ и ТАГМЕТ при использовании различного количества ГБЖ в металлошихте при выплавке стали в ДСП-150. Основные технологические показатели (средние за период) работы печей по анализируемым плавкам и их изменения при использовании ГБЖ в шихте представлены в таблице 4.1. Для анализа были отобраны массивы данных производимые на период использования ГБЖ и в период работы на 100% металлическом ломе.

Таблица 4.1. Изменение средних технологических показателей электроплавки при использовании ГБЖ в шихте по разным заводам.

№	Показатель	ДСП-150 (ВТЗ)			ДСП-150 (ТАГМЕТ)		
		Без добавки ГБЖ (02.2015)	С добавкой ГБЖ (05.2015)	Отклонение, %	Без добавки ГБЖ (11.2014)	С добавкой ГБЖ (02.2015)	Отклонение, %
1	Анализируемый массив плавов, шт.	49	201	-	360	345 (в т.ч. плавки с ГБЖ - 165 пл.)	-
2	Средний процент ГБЖ в завалке, %	0	12,9	-	0	11,2	-
3	Максимальное кол-во ГБЖ в шихте, т (%)	0	40 (27)	-	0	51 (36)	-
4	Стойкость ПУ футеровки ДСП (кампания футеровки, попавшая в анализируемый период), пл.	1404 (кампания № 17)	1170 (кампания № 18)	-16,6	1021 (кампания № 8)	508 (кампания № 9)	-50,2
5	Остаточная толщина кирпича в шлаковом поясе, мм (при первоначальной 450 мм)	100	70	-30,0	40	40	0

6	Скорость износа кирпича в шлаковом поясе, мм/пл.	0,25 (расчетная)	0,32 (расчетная)	28,0	0,40	0,81	102,5
7	Расход подварочной (заправочной) массы, кг/т	0,87	0,91	4,6	1,44	1,68	16,7
	Расход магнезиального порошка, кг/т	Н.д.	0,91	-	-	-	-
8	Расход торкрет массы, кг/т	0,272	0,301	10,7	1,0	1,3	30,0
9	Расход MgO-содержащего флюса, кг/т	10,4	10,6	1,4	6,5	9,1	40,0
10	Общий расход извести, кг/т	51,5	55,9	8,5	56,0	75,5	34,8

Из представленной таблицы видно, что на данных предприятиях при использовании добавки ГБЖ в металлошихте отмечено значительное снижение стойкости рабочей футеровки ДСП (на 16,6-50,2%), повышение удельного расхода огнеупорных материалов (до 30%) и MgO-содержащего флюса (до 40%). Это связано с повышением тепловой и химической нагрузки на футеровку ДСП обусловленное влиянием добавки ГБЖ. Повышенный износ рабочей футеровки печи связан с более агрессивным влиянием шлака, основность которого снижается при увеличении доли ГБЖ, в котором содержится значительное количество оксида кремния (4,3%). Необходимость повышения основности шлака влечет за собой повышение расхода извести и MgO-содержащего флюса, что и отмечено при анализе данных плавов. Увеличение количества шлака приводит к повышению расхода энергетических затрат для его теплосодержания. На повышенный износ футеровки при использовании ГБЖ также влияет повышенная тепловая нагрузка, обусловленная увеличением расходов основных энергоресурсов – электроэнергии, кислорода, углеродсодержащего материала и антрацита (см. раздел 3). Это связано с наличием в ГБЖ оксидов железа (около 8%) и 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. В связи с этим важно провести анализ изменения состава шлака при использовании добавки ГБЖ и при работе ДСП-150 на 100 % металлическом ломе.

На гистограммах на рисунке 4.1 показаны стойкости ПУ футеровки ДСП-150 ТАГМЕТ на разных кампаниях в 2014-2015 гг. при выплавке стали с использованием 100% лома и использованием ГБЖ в завалке. Отмечено значительное падение стойкости

футеровки печи в течение периода использования ГБЖ в завалке, что вызвало необходимость пересмотра ее нормативной стойкости.



Рис. 4.1. Стойкость ПУ футеровки ДСП-150 ТАГМЕТ при использовании 100% металлического лома и добавки ГБЖ в металлошихту.

После предварительного анализа влияния добавки ГБЖ на стойкость периклазоуглеродистой футеровки ДСП-150 ТАГМЕТ была предложена следующая схема оценки ее плановой стойкости в зависимости от доли ГБЖ в завалке, основности шлака и расходов шлакообразующих и огнеупорных материалов для обслуживания футеровки (см. таблицу 4.2). Далее была поставлена задача более углубленного изучения влияния ГБЖ на стойкость футеровки ДСП.

Таблица 4.2. Плановая стойкость периклазоуглеродистой футеровки ДСП в зависимости от доли ГБЖ в шихте и других параметров.

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

В условиях ЭСПЦ ВТЗ при выплавке стали в ДСП-150 провели анализ изменения стойкости кирпичной ПУ футеровки на различных кампаниях в зависимости от доли ГБЖ в шихте. Данные со стойкостями футеровки представлены в диаграмме на рис. 4.2. Построена аппроксимирующая линия тренда, показывающая изменение стойкости ДСП в зависимости от доли ГБЖ в шихте и показано уравнение зависимости. На диаграмме явно выражается снижение стойкости футеровки ДСП при увеличении добавки ГБЖ.

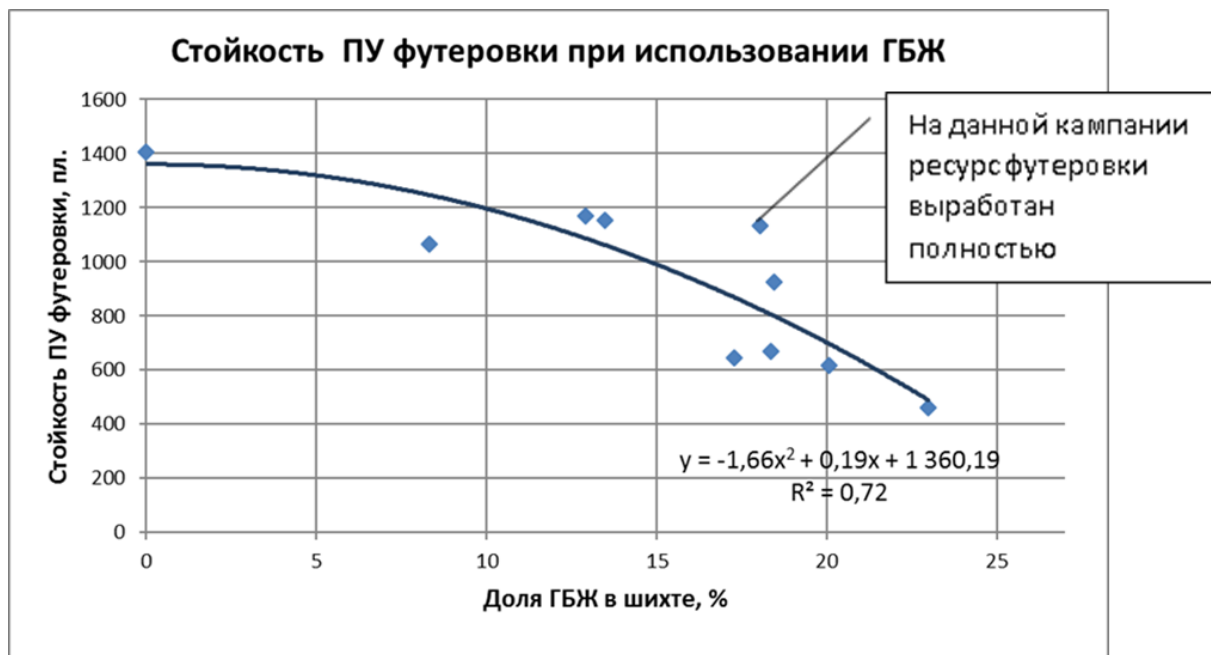


Рис. 4.2. Стойкость ПУ футеровки ДСП-150 ВТЗ при увеличении доли ГБЖ в шихте.

Согласно представленному графику, при увеличении доли ГБЖ в шихте на 10% снижение стойкости рабочего слоя футеровки может составлять около 400 плавок. Также зафиксировано снижение стойкости огнеупорной части свода ДСП примерно в 1,5 раза при средней доле ГБЖ в шихте 20 %. Это может быть связано с повышенной тепловой нагрузкой на свод, связанной с увеличением количества вводимой электрической и химической энергии при повышении доли ГБЖ, а также с воздействием теплового излучения шлака, характеристики которого в процессе эксплуатации не всегда обеспечивали необходимый уровень его вспенивания.

4.2. Анализ состава шлака и его влияния на магнезиальную футеровку при повышении доли ГБЖ

При оценке состояния рабочего слоя футеровки в процессе эксплуатации ДСП отмечено, что использование добавки ГБЖ в металлошихте явным образом отражается на стойкости футеровки печи. Это обусловлено изменением количества и состава шлака, а

также энергетических показателей плавки. Отмечено снижение стойкости периклазоуглеродистой футеровки печи на 30 - 70% (при увеличении доли ГБЖ в шихте до 35%) относительно стойкости футеровки печи, работающей на 100% ломе. Наличие оксидов железа в ГБЖ 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 отрицательно влияет на износ футеровки ДСП.

На рис. 4.3 показано расчетное количество SiO_2 в шлаке, вводимое добавкой ГБЖ при увеличении его доли в шихте.

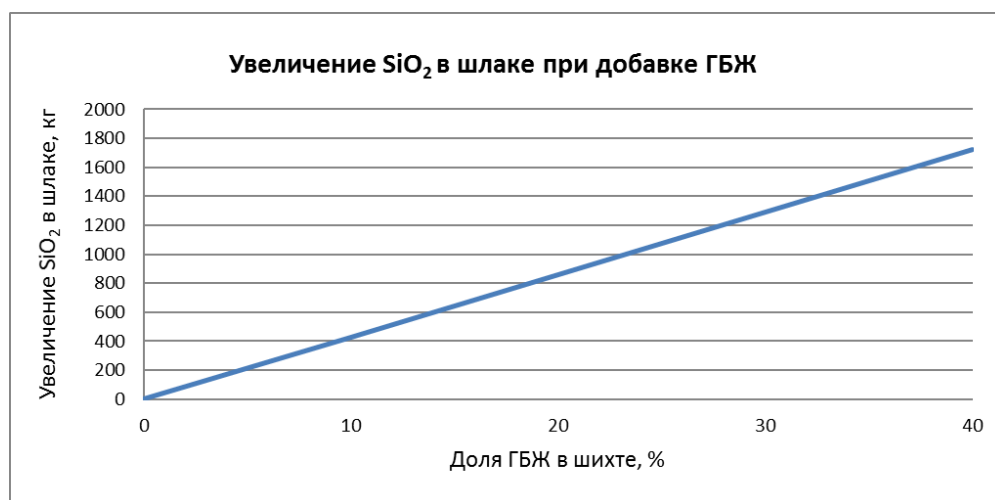


Рис. 4.3. Увеличение количества SiO_2 в шлаке за счет присадки ГБЖ.

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 весе плавки 135 т количество вносимого с ГБЖ оксида кремния составляет около 6,4 кг/т. Это приводит к необходимости повышения расхода извести с целью поддержания основности шлака на заданном уровне. При этом, из анализа массива плавов, произведенных в ДСП-150 ТАГМЕТ видно, что общее содержание SiO_2 в шлаке при увеличении доли ГБЖ до 35 % в шихте находилось примерно на одном уровне - около 17-19 % (рис. 4.4), а среднее количество образующегося шлака возрастало со 105 до 145 кг/т.

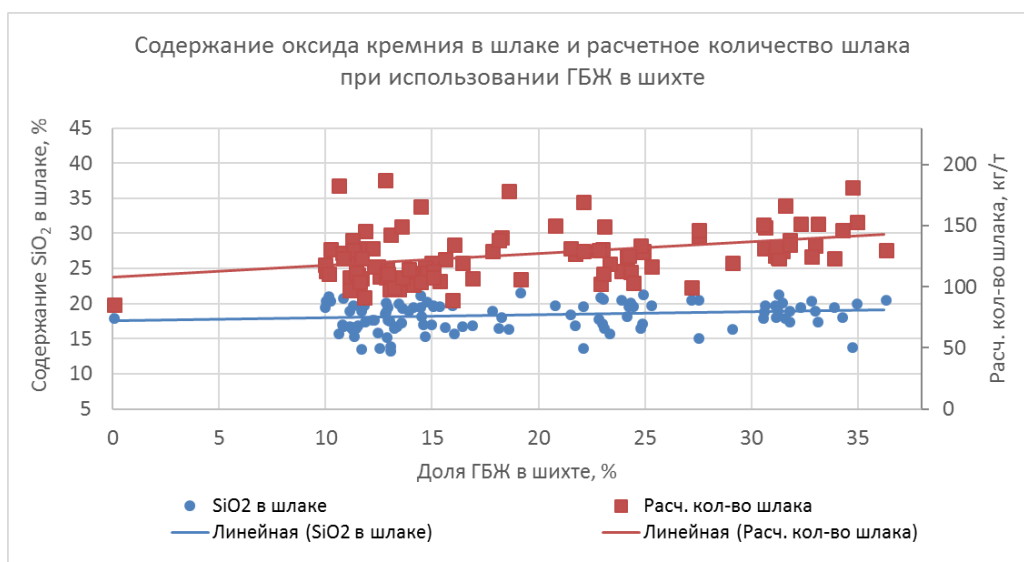


Рис.4.4. Содержание SiO₂ в шлаке и расчетное количество шлака при увеличении добавки ГБЖ.

Значительное влияние на окисленность металла и шлака, а также на износ футеровки оказывает наличие оксидов железа в ГБЖ. С учетом содержания оксидов железа в ГБЖ на уровне 8%, количество оксидов железа, поступающее в жидкую ванну вместе с ГБЖ представлено на графике на рис. 4.5. При этом из анализа массива плавок видно, что среднее фактическое содержание оксидов железа в шлаке при увеличении доли ГБЖ в шихте до 10-15% возрастало с 26 до 33% и при дальнейшем увеличении доли ГБЖ находилось примерно на одном уровне.

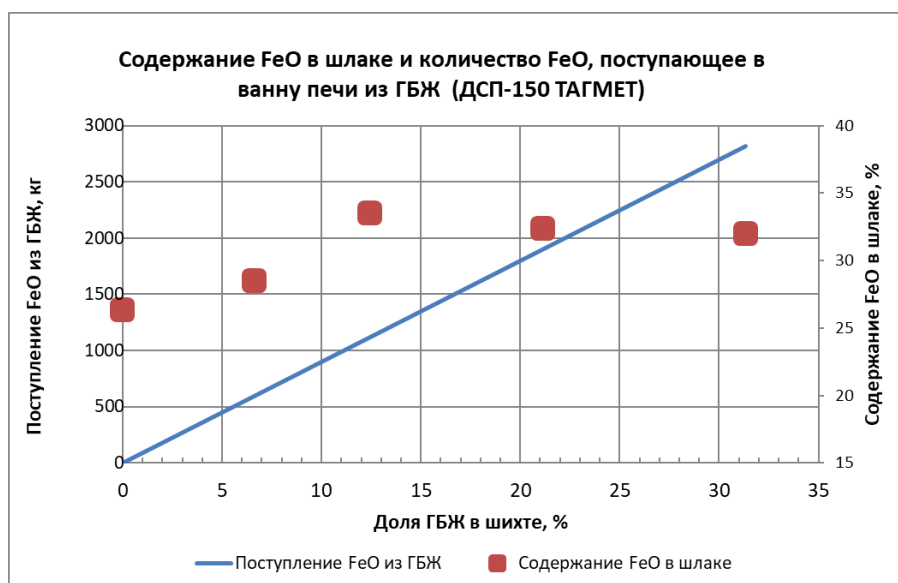


Рис. 4.5. Количество оксидов железа, поступающих из ГБЖ в печь и среднее содержание оксидов железа в шлаке в зависимости от доли ГБЖ в шихте.

Дополнительное количество вносимых оксидов железа требует также дополнительного ввода энергии для восстановления железа из оксидов и при увеличении добавки ГБЖ расход энергетических затрат возрастает.

После вывода ДСП из эксплуатации для проведения промежуточного ремонта футеровки производили ее демонтаж и снятие топографии износа рабочего слоя футеровки. 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 (см. приложение А). Значительно выраженный износ ПУ кирпича 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. В связи с чем в этих зонах использовали кирпич, изготовленный из сырья повышенного качества, что обеспечило снижение скорости износа футеровки в данных локальных областях.

В процессе эксплуатации ДСП визуально оценивали состояние рабочего слоя футеровки после выпуска плавки из печи. На рис. 4.6 показаны различные состояния рабочей футеровки ДСП-150 в процессе эксплуатации. При надлежащем обслуживании магнезиальной футеровки печи, а именно своевременной заправке откосов печи магнезиальными массами, торкретировании, наведении магнезиального пенящегося шлака, рабочая футеровка печи имеет вид, показанный на фотографии на рис. 4.6a. Видно, что стены кирпичной футеровки ошлакованы (кирпичная футеровка не видна) защитным гарнисажем. Такого состояния футеровки стен добиваются наведением магнезиальных шлаков с определенными характеристиками и их вспениванием. При ведении плавки с использованием жидкоподвижных шлаков с пониженной основностью, плохо пенящихся, либо при ненадлежащем обслуживании рабочей футеровки, ее состояние будет неудовлетворительное. Например, на рис. 4.6b. видно, что кирпичная футеровка стен “оголена” (отчетливо виден кирпич) и имеются сколы кирпича, что связано с воздействием на нее шлакового расплава. При этом большое значение имеет температура шлака, которая влияет на образование шлакового гарнисажа на футеровке рабочего слоя печи.

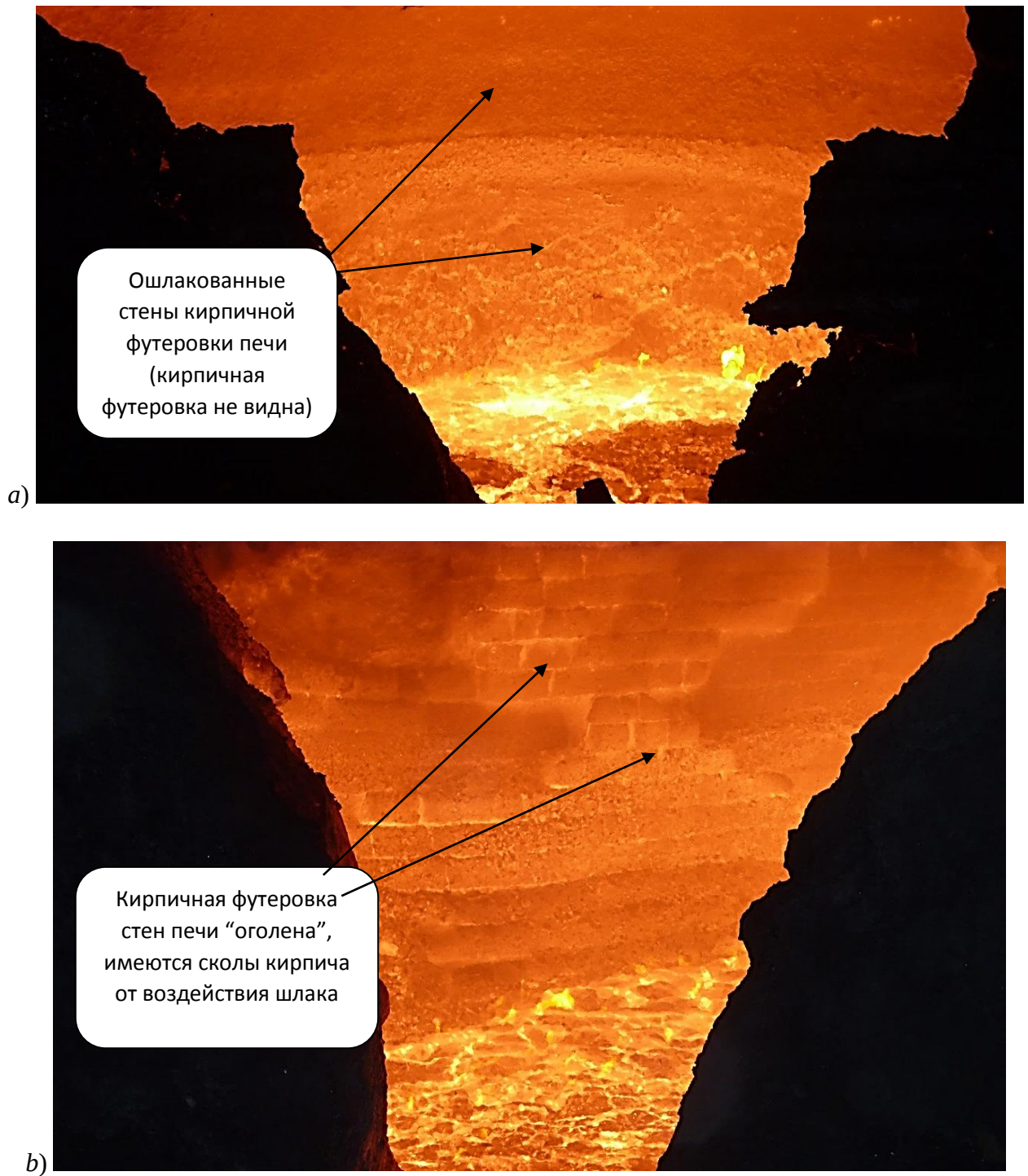


Рис. 4.6. Состояние футеровки ДСП-150 в процессе эксплуатации (вид через рабочее окно печи): удовлетворительное состояние (а) и неудовлетворительное состояние (б).

На рис. 4.7 показано состояние футеровки ДСП-150 после вывода съемной подины на промежуточный ремонт (замену) футеровки. Стойкость футеровки составила 508 плавов. Эксплуатация печи осуществлялась с использованием добавки ГБЖ в металлошихту. Для сравнения, стойкость такой футеровки при работе на 100 % металлическом ломе (без использования ГБЖ) ранее составляла более 1000 плавов. По

периметру футеровки в районе шлаковой зоны отмечен повышенный износ периклазоуглеродистого кирпича, что связано с влиянием шлакового расплава. Повышенный локальный износ также наблюдается и в горячих зонах - местах расположения электродов и газокислородных фурм.



Рис. 4.7. Состояние футеровки ДСП-150 после выпуска 508 плавов при эксплуатации печи с использованием ГБЖ в завалке.

Критерием вывода футеровки печи из эксплуатации стал повышенный износ ПУ кирпича в шлаковом поясе печи. Минимальная остаточная толщина кирпича составила 40 мм.

В связи с этим целесообразно провести анализ изменения состава шлака при повышении добавки ГБЖ в печи. Для этого случайным образом отобрали массив, состоящий из 107 плавов с использованием разного количества ГБЖ в ДСП-150 ТАГМЕТ. Данные плавки были сгруппированы по интервалам с разным содержанием ГБЖ в шихте. Для сравнения приведен химический состав шлака при работе ДСП на 100% металлическом ломе (без использования ГБЖ). В таблице 4.3 представлены усредненные показатели по химическому составу шлака перед выпуском плавки и основности по интервалам с разным содержанием ГБЖ в завалке. А также показан рекомендуемый состав шлака (по данным некоторых работ [14, 46, 57, 66, 88, 89, 90]), который позволяет обеспечивать его хорошее вспенивание и минимальное воздействие на ПУ футеровку печи.

Таблица 4.3. Химический состав шлака ДСП-150 ТАГМЕТ и его основность (усредненные значения) при использовании разного количества ГБЖ в завалке.

Доля ГБЖ в шихте, %	Химический состав печного шлака, %							Основ- ность	Стойкость футеровки ДСП за данный период, пл
	MgO	CaO	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	FeO (расч.)		
без ГБЖ	5,30	39,1	0,58	18,1	5,72	4,78	26,4	2,16	1021
0-10	5,94	34,8	0,45	19,5	5,68	5,16	28,5	1,80	670
10-15	5,96	32,4	0,36	18,2	4,69	4,95	33,5	1,80	
15-25	6,04	33,2	0,39	18,4	4,89	4,75	32,4	1,81	
25-36	5,94	32,9	0,38	19,0	4,92	4,84	32,0	1,74	
Рекомендованный состав шлака по данным работ [14, 46, 57, 66, 88, 89, 90]									
	8-12						15-30	2-3	

Данные из таблицы 4.3 отражены в гистограммах на рис. 4.8.

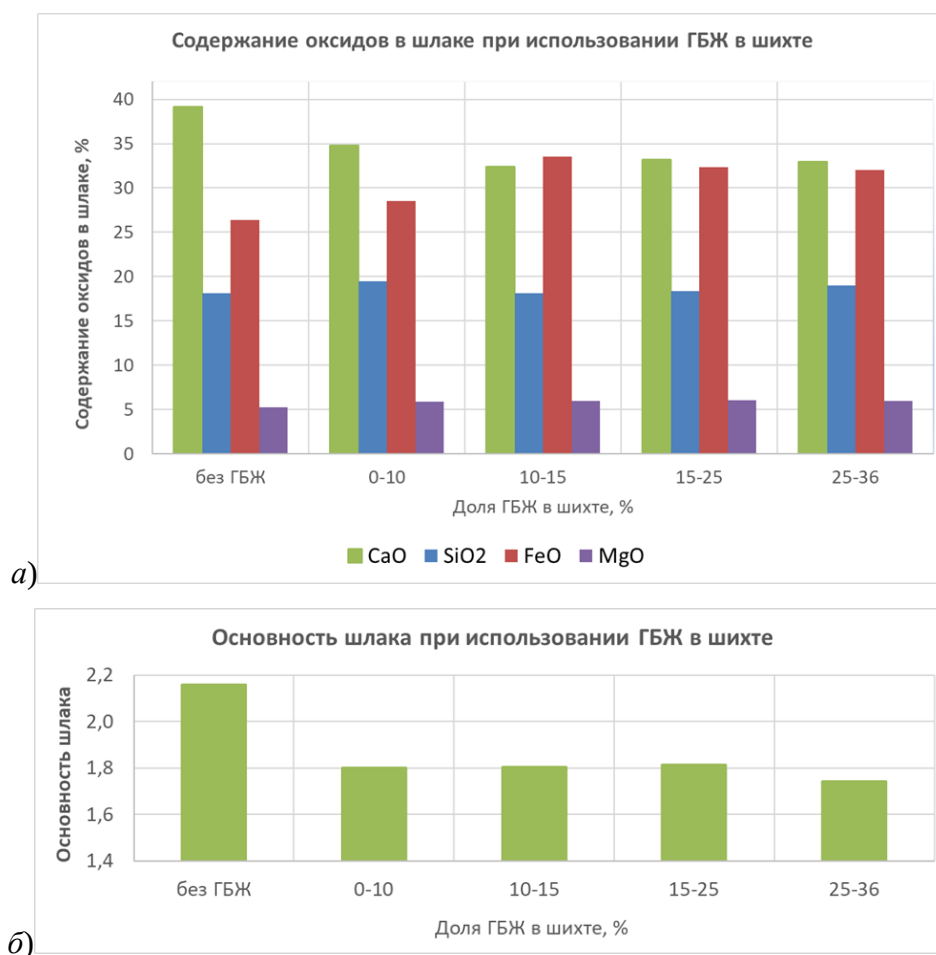


Рис. 4.8. Содержание оксидов в шлаке (а) и основность (б) при использовании разного количества ГБЖ в завалке (анализ 107 плавов).

Из представленных данных видно, что состав печного шлака при использовании ГБЖ отличается от рекомендованного и от состава шлака, образующегося при работе

ДСП на 100% ломе, что оказывает отрицательное воздействие на футеровку ДСП. Изменение состава шлака вызвано наличием значительного количества SiO_2 (4,3%) в ГБЖ, а также FeO_x (около 8%).

Увеличение добавки ГБЖ в шихте отражается на содержании оксидов кальция и железа в шлаке. Снижение основности шлака и повышение окисленности повышает его агрессивность по отношению к магнезиальной футеровке печи. Среднее содержание FeO при этом увеличилось с 26% до 32%, содержание CaO уменьшилось с 39% до 33%. Основность шлака уменьшилась с 2,16 до 1,75. Повышенная окисленность и пониженная основность шлака увеличивают жидкоподвижность шлака, снижают способность его вспенивания и оказывают негативное влияние на стойкость футеровки печи. Снижение общей стойкости рабочей футеровки ДСП при использовании ГБЖ в завалке на период проведения анализа составило 34,4% (с 1021 до 670 плавов). Отмечено также значительное увеличение расходов огнеупорных масс (заправочных и торкрет-масс) для обслуживания футеровки печи. Повышенный износ огнеупорной футеровки также связан с увеличенными тепловыми нагрузками на рабочую футеровку печи, обусловленными повышенным расходом электроэнергии для восстановления оксида железа, присутствующего в ГБЖ и теплосодержанием повышенного количества шлака.

На рис. 4.9 показано расчетное количество образующегося шлака при увеличении добавки ГБЖ. В расчете учитывали количество добавляемых шлакообразующих материалов, количество оксида кремния, переходящего из ГБЖ в шлак, а также содержание оксида железа, марганца и алюминия в шлаке.

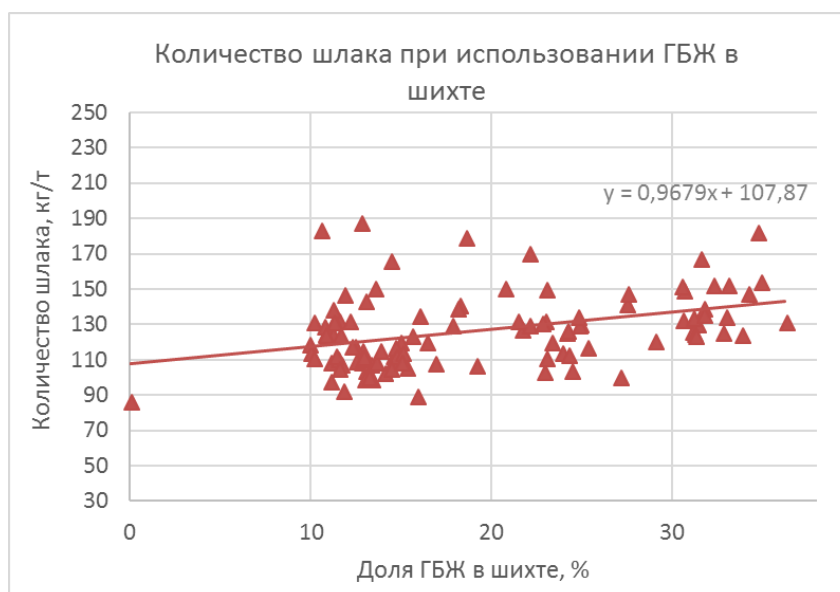


Рис. 4.9. Расчетное количество шлака при использовании добавки ГБЖ в шихту.

Из диаграммы на рис.4.9 видно, что при увеличении доли ГБЖ в шихте до 36% расчетное количество образующегося шлака увеличивается в среднем с 108 до 143 кг/т (на 32%).

В период использования ГБЖ при визуальном осмотре футеровки печи во время эксплуатации отмечали ее неудовлетворительное состояние (оголение кирпичной кладки стен), вызванное воздействием шлака.

Для сравнения в таблице 4.4 представлены усредненные показатели по химическому составу шлака и количеству отданных шлакообразующих материалов (известь и магнезиально-известковый флюс) на плавку при использовании разного количества ГБЖ в завалке (анализ 201 плавки) в условиях выплавки стали в ДСП-150 ВТЗ. Для сравнения приведен химический состав шлака при работе ДСП на 100% металлическом ломе (без использования ГБЖ). Также показан рекомендуемый состав шлака (по данным некоторых работ [16, 47, 54, 55, 59, 76, 122]).

Таблица 4.4. Химический состав шлака ДСП-150 ВТЗ, основность шлака и количество отданных шлакообразующих материалов (усредненные значения) при использовании разного количества ГБЖ в завалке.

Доля ГБЖ в шихте, %	Химический состав печного шлака, %							Основ -ность	Кол-во шлакообр. добавок, кг/т	Стойкость футеровки ДСП за данный период, пл
	MgO	CaO	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	FeO (расч.)			
Без ГБЖ	8,40	32,2	0,392	17,06	5,08	7,19	24,4	1,9	55,2	1404
0-12	7,61	28,1	0,384	15,06	4,41	5,79	30,7	1,9	65,1	1170
12-15	7,21	27,4	0,391	14,90	4,74	5,90	30,1	1,8	64,2	
15-20	7,53	29,2	0,345	15,42	4,35	5,60	29,6	1,9	69,2	
20-24	8,49	29,4	0,315	15,78	4,20	4,96	29,4	1,9	75,9	
> 24	5,25	29,3	0,368	13,49	3,94	4,38	29,3	2,2	87,9	
Рекомендованный состав шлака по данным работ [16, 47, 54, 55, 59, 76, 122]										
	8-12						15-30	2-3		

Данные из таблицы 4.4 отражены в гистограммах на рис.4.10.

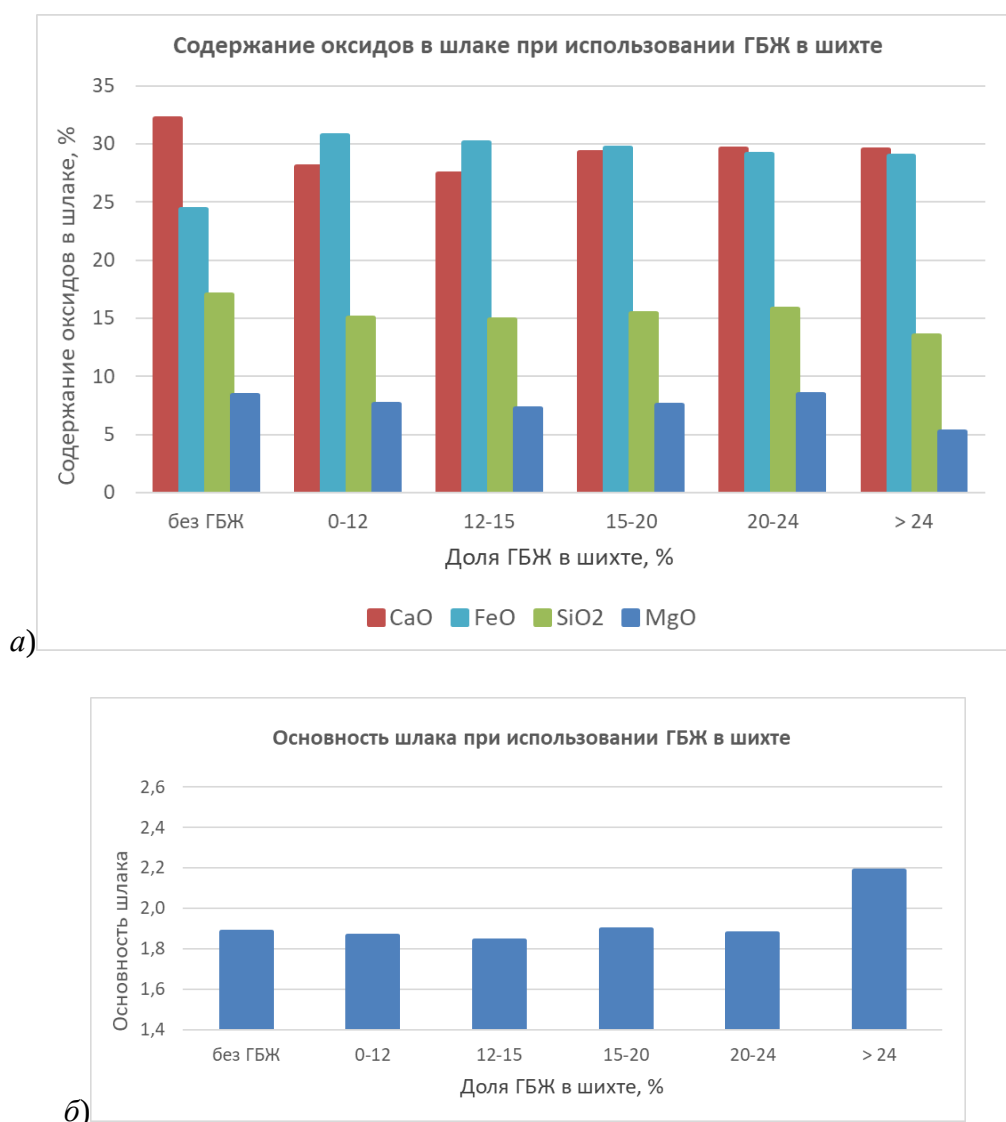


Рис. 4.10. Содержание оксидов в шлаке (а) и основность (б) при использовании разного количества ГБЖ в завалке (анализ 201 плавки).

Основность шлака при увеличении добавки ГБЖ поддерживали на одном уровне (рис.4.10б). Видно, что в данном случае основность шлака не является определяющим фактором при оценке износа периклазоуглеродистой футеровки печи, так как находится на одном уровне. Увеличение основности при доле ГБЖ > 24 % связано с увеличенным расходом извести (таблица 4.4).

Из представленных данных важно отметить, что при добавке ГБЖ возрастало содержание FeO в шлаке с 24% до 30% и оставалось примерно на одном уровне при дальнейшем увеличении доли ГБЖ в шихте. При увеличении содержания FeO в шлаке уменьшается межфазное натяжение и вязкость шлака. При этом повышается его жидкотекучесть, что отрицательно отражается на стойкости футеровки ДСП. ГБЖ содержит значительное количество кислорода в виде недовосстановленных окислов железа. Также дополнительное количество кислорода поступает за счет окисления его

развитой поверхности кислородом атмосферы печи, чему способствует длительный его нагрев. Содержание углерода в ГБЖ недостаточно для восстановления окислов железа, поступающих с этим сырьем и образующихся в процессе плавления. Все это способствует повышенному содержанию окислов железа в шлаке.

На примере диаграммы состояния системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO}$ (рис. 4.11) можно видеть, что повышение содержания оксида железа в данной системе снижает температуру плавления и увеличивает жидкоподвижность шлака и, соответственно, будет оказывать негативное влияние на износ футеровки.

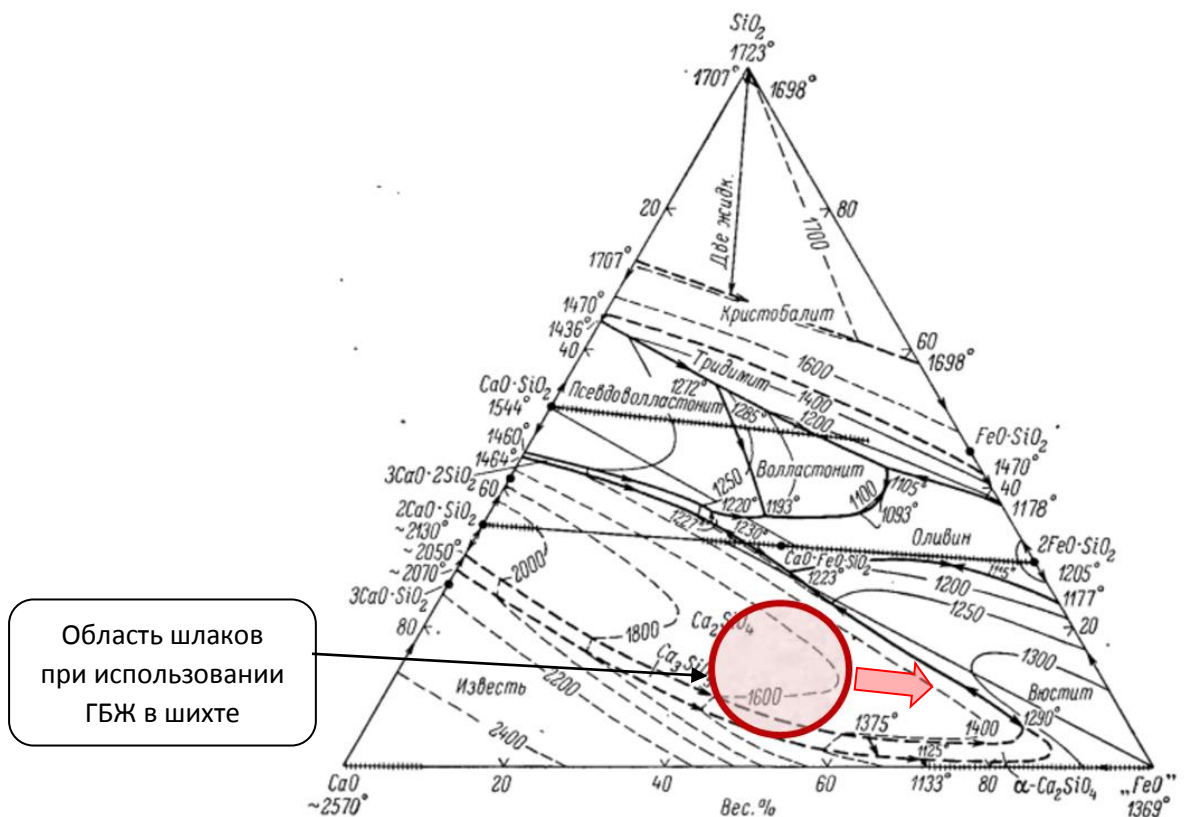


Рис. 4.11. Диаграмма состояния системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO}$.

Из диаграммы состояния $\text{MgO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (рис. 4.12) видно, что добавка значительного количества оксида магния в систему приводит к повышению температуры плавления, и, соответственно, увеличивает ее вязкость.

Содержание MgO в шлаке в процессе использования ГБЖ находилось ближе к нижнему пределу содержания MgO рекомендованного состава шлака, что при высоком содержании FeO и при низкой вязкости шлака вызывает переход MgO из футеровки в шлак и система стремиться к насыщению оксидом магния.

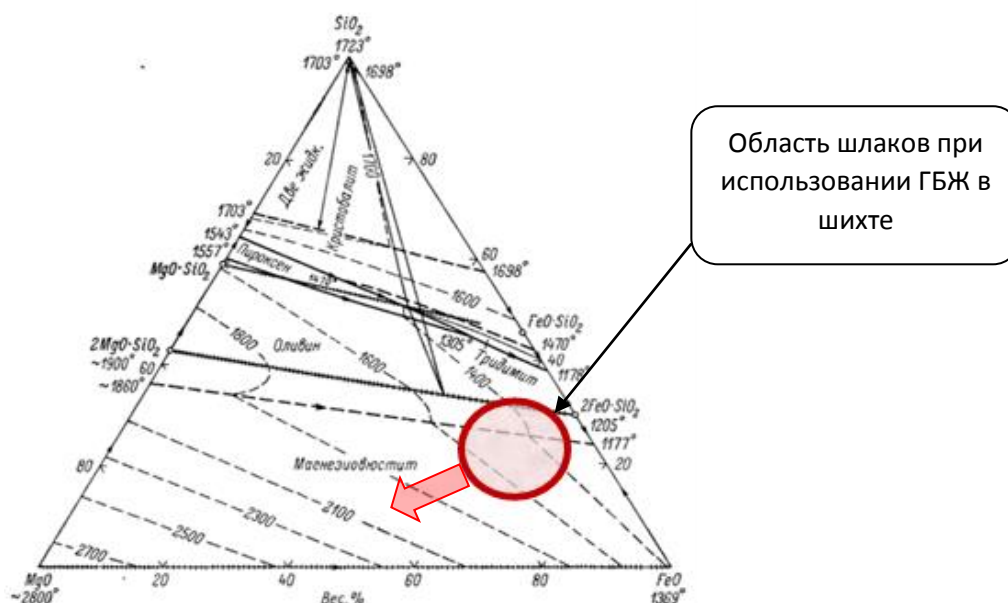


Рис. 4.12. Диаграмма состояния системы $\text{MgO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Снижение общей стойкости рабочей футеровки ДСП при использовании ГБЖ в завалке на период проведения анализа составило 16,7% (с 1404 до 1170 плавов). Отмечено также увеличение расходов заправочных и торкрет-масс для обслуживания футеровки печи. В данном случае, учитывая изменение химического состава шлака, негативное влияние на стойкость ПУ футеровки печи оказывает повышенная окисленность шлака и тепловые нагрузки, вызванные необходимостью теплосодержания повышенного количества образующегося шлака.

Из графика на рис. 4.13 видно, что количество оксида магния в шлаке возрастало при увеличении добавки ГБЖ, что связано в первую очередь с его переходом из магнезиальной футеровки в шлак.

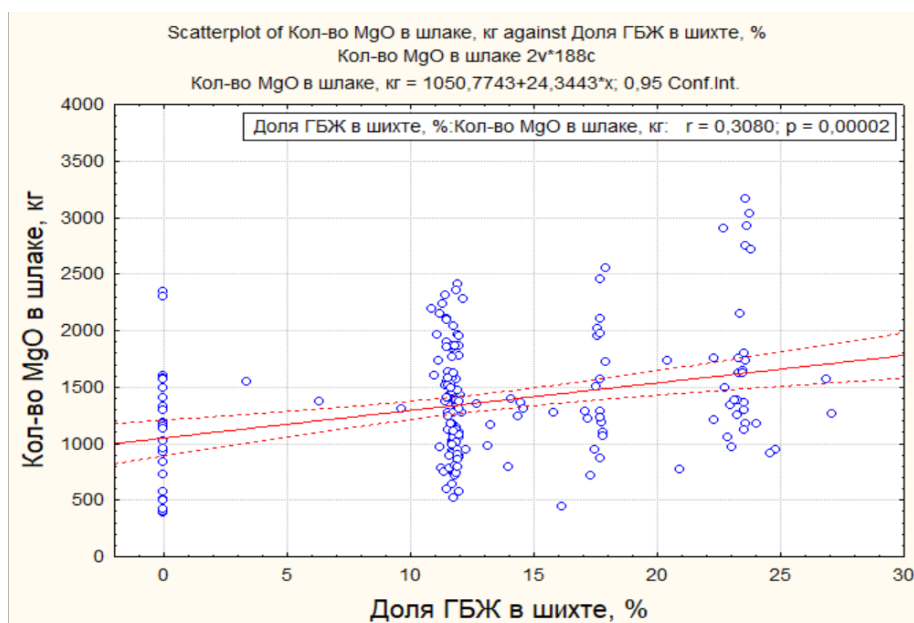


Рис.4.13. Количество MgO в шлаке при увеличении добавки ГБЖ.

При этом среднее содержание MgO в шлаке при увеличении добавки ГБЖ находилось примерно на одном уровне (7 - 8%), который соответствует пределу насыщения оксида магния в шлаке.

Далее на примере массива плавов был проведен анализ прироста содержания оксида магния в шлаке, который переходит из периклазоуглеродистой футеровки.

4.3. Балансовый анализ процесса перехода MgO из футеровки в шлак

Для оценки скорости износа рабочего слоя магнезиальной футеровки при увеличении доли ГБЖ в шихте был проведен балансовый анализ перехода MgO из футеровки в шлаковый расплав.

Анализ проводился с использованием массива плавов, производимых на ДСП-150 ВТЗ с применением добавки ГБЖ в металлошихте. Массив, состоящий из 194 плавов, 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.

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

$$(MgO)_{фут} = (MgO)_{шл} - (MgO)_{флюс}, \quad (4.1)$$

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:

$$(MgO)_{флюс} = Q_{флюс} * 0,695 / Q_{шл} * 100, \quad (4.2)$$

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

0,695 – доля оксида магния в магнезиальном флюсе;

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

Расчет $Q_{шл}$ производили по формуле, которая учитывает переход извести, магнезиального флюса и оксида кремния из добавки ГБЖ в шлак, а также учитывает фактическое содержание оксидов железа, марганца и алюминия в шлаке:

$$Q_{шл} = (Q_{изв} + Q_{флюс} + Q_{ГБЖ} * 0,043 * 1000) * 100 / (100 - X_{(FeOx, MnO, Al_2O_3)}), \quad (4.3)$$

где $Q_{изв}$ – количество добавляемой извести на плавку, кг;

$Q_{\text{флюс}}$ – количество добавляемого магниезиального флюса на плавку, кг;

$Q_{\text{ГБЖ}} * 0,043 * 1000$ – количество оксида кремния, поступающего с добавкой ГБЖ, кг;

$100 / (100 - X_{\text{FeOx, MnO, Al}_2\text{O}_3})$ – коэффициент, учитывающий фактическое содержание оксидов железа, марганца и алюминия в шлаке;

$X_{\text{(FeOx, MnO, Al}_2\text{O}_3)}$ – суммарное содержание оксидов железа, марганца и алюминия в шлаке.

При проведении расчетов были приняты следующие допущения:

- 1) При расчете количества шлака не учитывался приход элементов из металла в шлак за счет их окисления в металле.
- 2) При расчете количества шлака не учитывались компоненты, содержание которых менее 0,5 %.
- 3) Химический состав шлака на протяжении плавки не меняется.

Расчетные и фактические данные были систематизированы и представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5. Содержание оксида магния (усредненное в интервале) в шлаке ДСП-150 при использовании разного количества ГБЖ в завалке.

Количество ГБЖ, %	Средний расход ГБЖ в интервале, %	MgO в шлаке общее, %	MgO в шлаке из магнезиально го флюса, %	MgO в шлаке из футеровки, %	Кол-во MgO- флюса, кг/т	Масса шлака, кг/т
0-10	0,7	8,17	6,77	1,40	9,0	93,1
10-15	11,9	7,57	6,26	1,31	10,7	119,8
15-20	17,5	7,53	5,50	2,03	10,3	129,5
20-27	23,4	7,90	5,65	2,25	11,7	145,5

Данные из таблицы представлены на графиках на рис. 4.14 и в гистограммах на рис. 4.15. Построены линейные линии тренда, показаны уравнения аппроксимирующих кривых и величина достоверности аппроксимации.

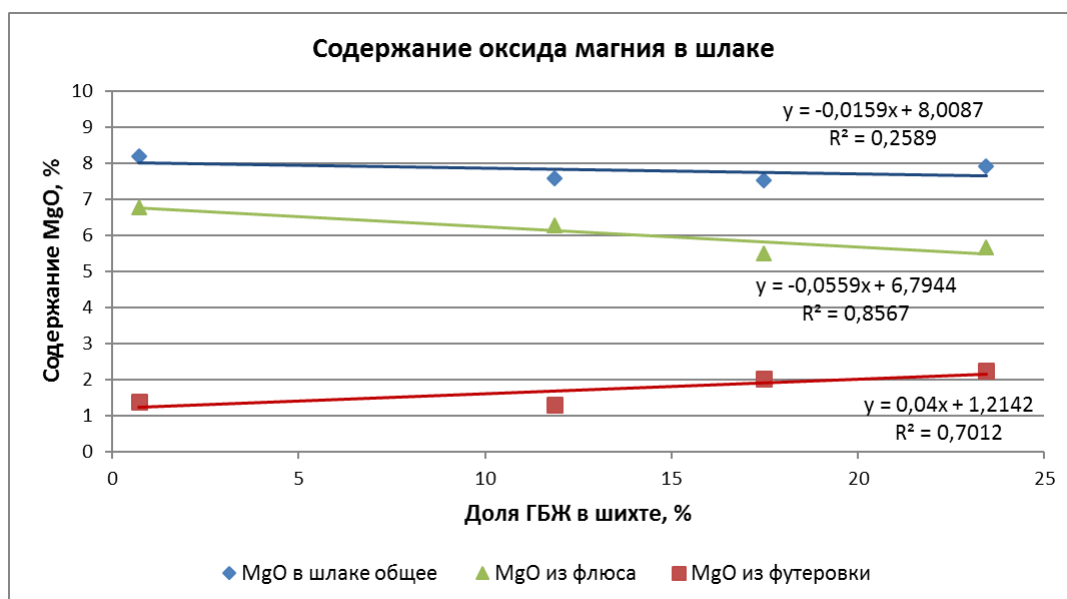


Рис. 4.14. Содержание оксида магния в шлаке при использовании разного количества ГБЖ в завалке (анализ 194 плавки).

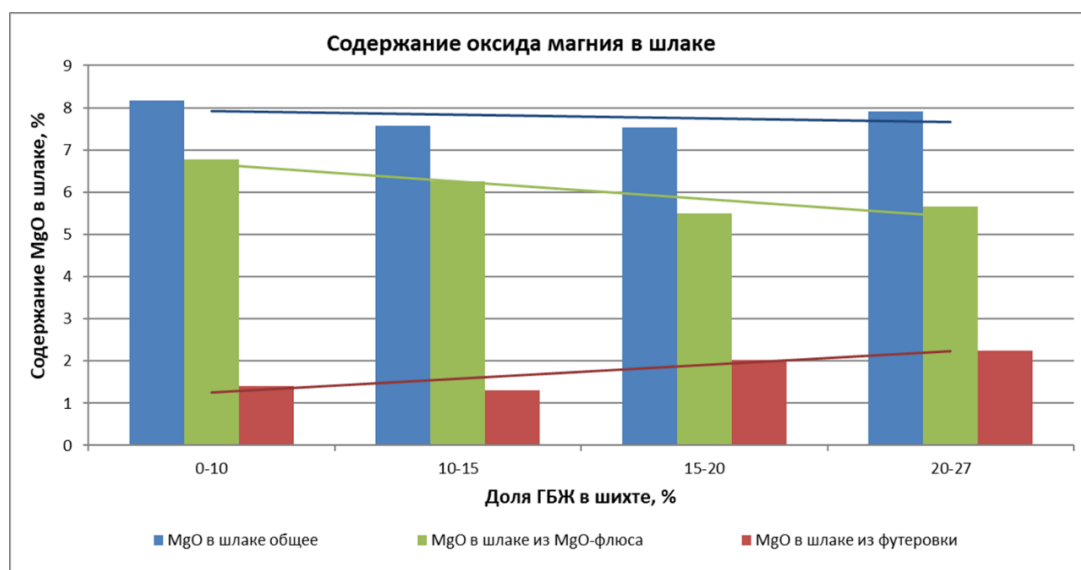


Рис. 4.15. Содержание оксида магния в шлаке при использовании разного количества ГБЖ в завалке (анализ 194 плавки).

Из представленных на рисунках данных видно, что количество MgO, переходящее из футеровки в шлак, при увеличении добавки ГБЖ до 24% возрастает с 1,2% до 2,2%. На графике на рис. 4.16 показано удельное расчетное количество образующегося шлака при увеличении добавки ГБЖ, а также на рис. 4.17 приведено среднее количество MgO, переходящее из футеровки в шлак.



Рис. 4.16. Удельное количество шлака при увеличении добавки ГБЖ.

Из графика на рис. 4.14 видно, что при повышении доли ГБЖ в шихте на 5 % количество шлака увеличивается примерно на 12 кг/т.

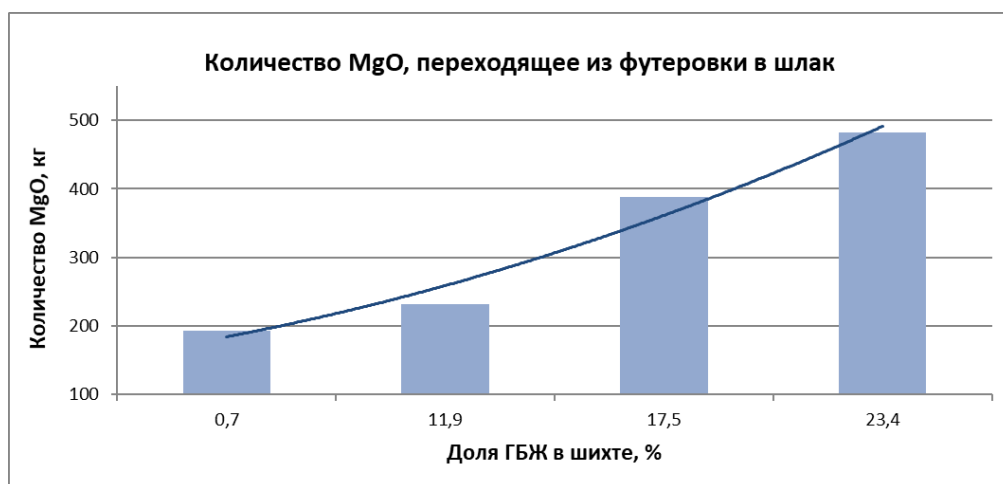


Рис. 4.17. Среднее количество оксида магния, переходящее из футеровки в шлак при увеличении добавки ГБЖ за плавку.

Из гистограмм на рис. 4.17 видно, что при добавке ГБЖ в шихту количество MgO, переходящее из огнеупорной футеровки в шлак значительно возросло и при этом наблюдали повышенный износ рабочего слоя магнезиальной футеровки. Об этом также свидетельствует повышенный расход магнезиальных масс для заправки подины и откосов печи и снижение общей стойкости периклазоуглеродистой футеровки печи.

Среднее удельное количество MgO, переходящее из футеровки в шлак при увеличении добавки ГБЖ за плавку представлено в гистограммах (рис. 4.18).

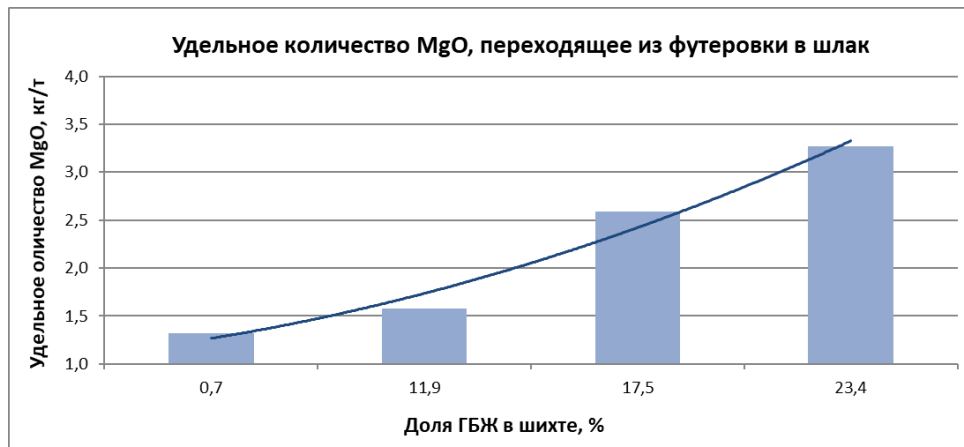


Рис. 4.18. Среднее удельное количество оксида магния, переходящее из футеровки в шлак при увеличении добавки ГБЖ.

Для сравнения сделаем оценочный расчет расхода оксида магния из рабочего слоя футеровки ДСП-150 на примере кампании печи с использованием ГБЖ, с учетом фактического расхода магнезиальных и периклазоуглеродистых материалов. Согласно данным таблицы 4.1 стойкость кампании ПУ футеровки печи составила 1170 плавов. Средняя доля ГБЖ в шихте за кампанию составила 12,9%. Средний удельный расход магнезиальной торкрет-массы составил 0,301 кг/т. Средний удельный расход магнезиальной подварочной массы и периклазового порошка составил 0,91 кг/т. Средний вес плавки за кампанию – 147,6 т. Расход ПУ изделий с учетом топографии износа футеровки составил 14600 кг за кампанию (остаточная толщина ПУ изделий в кладке составила 40-70 мм при первоначальной 400 и 450 мм и учетом износа 8-ти рядов кладки - с 7-го по 14 ряд).

Среднее количество оксида магния, перешедшее из рабочего слоя футеровки в шлак за плавку на данной кампании печи, составит:

$$Q_{\text{MgO фут факт}} = (Q_{\text{т.м.}} * 0,92 + Q_{\text{п.м.}} * 0,81 + Q_{\text{п.п.}} * 0,89) * 147,6 + M_{\text{ПУфут}} * 0,83 / 1170 = (0,301 * 0,92 + 0,91 * 0,81 + 0,91 * 0,89) * 147,6 + 14600 * 0,83 / 1170 = (0,277 + 0,737 + 0,81) * 147,6 + 10,36 = 269,2 + 10,36 = 279,6 \text{ кг.} \quad (4.4)$$

где $Q_{\text{т.м.}} * 0,92$ – удельный расход MgO из торкрет-массы с содержанием MgO 92%, кг/т;

$Q_{\text{п.м.}} * 0,81$ – удельный расход MgO из подварочной массы с содержанием MgO 81%, кг/т;

$Q_{\text{п.п.}} * 0,89$ – удельный расход MgO из периклазового порошка с содержанием MgO 89%, кг/т;

$M_{\text{ПУ фут}} * 0,83$ – расход MgO из ПУ изделий с содержанием MgO 83% за кампанию, кг.

Согласно построенному графику, показанному на рис. 4.17, при средней доле ГБЖ в шихте 12,9% количество оксида магния, переходящего из футеровки в шлак за плавку составляет около **280 кг**, что соответствует фактическому количеству MgO , перешедшему из магнезиального рабочего слоя футеровки в шлак, рассчитанному выше.

4.4. Выводы по главе 4

Показано изменение стойкости футеровки ДСП-150 и расхода огнеупорных материалов для ее обслуживания при увеличении добавки ГБЖ. На металлургических предприятиях отмечено значительное снижение стойкости футеровки промышленных печей при использовании ГБЖ. На примере ДСП-150 ВТЗ построен график зависимости стойкости периклазоуглеродистой футеровки печи от доли ГБЖ в шихте. При увеличении доли ГБЖ в шихте на 10 % снижение стойкости рабочего слоя футеровки может составлять около 400 плавов, что обусловлено изменением характеристик печного шлака.

Предложена схема оценки плановой стойкости футеровки ДСП в зависимости от доли ГБЖ в завалке, основности шлака и расходов шлакообразующих и огнеупорных материалов для обслуживания футеровки.

Проведен анализ влияния повышения добавки горячебрикетированного железа в завалке на химический состав шлака в печи. Отмечено повышение окисленности шлака при использовании добавки ГБЖ, а также построена зависимость, показывающая увеличение количества шлака при увеличении доли ГБЖ. Все это повлияло на увеличение удельного расхода электроэнергии, вводимой в печь и негативно отразилось на износе футеровки печи. Показаны состояния футеровки при работе на печных шлаках с разным химическим составом.

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.

Учитывая значительное падение стойкости футеровки печи при использовании ГБЖ целесообразно провести корректировку шлакового режима, с целью поддержания шлака на рекомендованном уровне и оценить экономическую целесообразность применения данной корректировки.

5. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГБЖ В ШИХТЕ

5.1. Совершенствование технологического режима и разработка рекомендаций по обслуживанию футеровки ДСП-150 в условиях использования ГБЖ

Стойкость футеровки дуговой сталеплавильной печи оказывает существенное влияние на удельные затраты при производстве стали. За последнее время на металлургических предприятиях России достигнуты высокие показатели стойкости рабочих футеровок ДСП, работающих на твердой завалке – более 1500 плавов за кампанию (до промежуточного ремонта кирпичной футеровки).

Это связано в первую очередь с квалифицированным комплексным подходом к обслуживанию футеровки печи и применением качественных огнеупорных материалов и оборудования. Применение технологии насыщения шлака оксидом магния и его вспенивания также позволяет повысить срок службы футеровки. В современных ДСП для рабочей футеровки используется периклазоуглеродистый кирпич (кладка стен) и магнезиальная набивная масса (футеровка подины и откосов). При выплавке стали в электропечи важно учитывать текущее состояние футеровки и поддерживать ее в надлежащем виде в течение всей кампании печи. Одними из основных мероприятий по поддержанию футеровки печи в нормальном состоянии являются своевременное торкретирование изношенных участков футеровки, заправка подины и откосов, поддержание магнезиального шлака высокой основности на требуемом уровне в течение всей плавки с целью снижения его агрессивного влияния на периклазоуглеродистую кирпичную футеровку. 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. Вспененный шлак благодаря своей низкой теплопроводности также экранирует излучение электрической дуги и не только способствует более полному усвоению электрической энергии металлом, но и предохраняет огнеупорную футеровку печи. Неудовлетворительное состояние огнеупорной футеровки может привести к снижению ее срока службы или аварийному проходу металла через металлический кожух, что в конечном итоге приведет к увеличению времени простоя цеха, трудовым затратам при замене футеровки и снизит общую производительность печи. Следует отметить, что для

получения более качественного и низкоуглеродистого металла, как правило, требуется увеличение времени обработки металла и дополнительные затраты энергии, что отрицательно отражается на стойкости футеровки металлургического агрегата.

Для снижения агрессивности воздействия шлака на футеровку печи в условиях использования ГБЖ требуется корректировка отдачи шлакообразующих материалов с целью обеспечения рекомендуемых характеристик шлака. Учитывая текущий опыт применения ГБЖ на металлургических предприятиях, были разработаны технологические рекомендации по ведению плавки и обслуживанию футеровки печи, с целью поддержания оптимальных характеристик шлака и поддержания стойкости футеровки печи на уровне 1000 плавов и более.

5.1.1. Рекомендации по достижению требуемого содержания углерода в полупродукте и окисленности

Содержащийся в ГБЖ углерод оказывает существенное влияние на процесс окисления. Чем выше содержание углерода, тем позднее наступает период замедленного окисления железа, который наступает после выгорания углерода в ГБЖ. Скорость окисления в этот период практически не зависит от содержания углерода, возрастая с увеличением открытой пористости. Обладая высокой удельной поверхностью, губчатое железо в отличие от лома характеризуется высокой склонностью к окислению при повышенных температурах. При нагреве в окислительной атмосфере в условиях неограниченного доступа кислорода к ГБЖ степень окисления железа может быть весьма большой. Эффективной мерой снижения окисления, помимо сокращения времени нагрева, является повышение содержания углерода в ГБЖ. Применительно к нагреву слоя ГБЖ углерод может быть введен в состав шихты с целью уменьшения окислительного потенциала атмосферы за счет реакции образования СО.

Характерным для губчатого железа является очень большая удельная поверхность, включая внешнюю поверхность кусков и внутреннюю поверхность открытых пор. Большая величина внутренней поверхности железа прямого восстановления объясняется высокой пористостью и очень малым размером пор, возникающих в результате изменения кристаллографической структуры при превращении окислов в металлическое железо [136]. Низкой теплопроводностью в сочетании с большой удельной поверхностью и химической активностью восстановленного железа определяют его повышенную склонность к окислению.

При анализе имеющихся массивов плавов с использованием добавки ГБЖ было отмечено, что среднее содержание углерода в полупродукте находится на более низком

уровне (0,06% при доле ГБЖ в шихте 23%) по сравнению с плавками на 100% металлическом ломе (0,08%). Среднее содержание оксидов железа в шлаке при введении добавки ГБЖ увеличивалось и находилось примерно на уровне 30-32%, что выше примерно на 6% среднего содержания оксидов железа в шлаке (24-26%) при выплавке полупродукта с использованием 100% лома. Повышенная окисленность шлака более 35-40% приводит к затруднению его вспенивания и повышению расхода электроэнергии. Добавка ГБЖ в шихту позволяет достигать более низких значений содержания углерода в полупродукте, что открывает возможность снижения длительности плавки, расхода кислорода и увеличения производительности ДСП.

В связи с этим, при текущих энерготехнологических режимах плавки, рекомендуется рассмотреть возможность уменьшения длительности плавки и производить выпуск полупродукта при более низкой температуре, что позволит увеличить производительность ДСП. Дополнительный ввод углеродсодержащих материалов позволит также увеличить производительность печи. Снижение расхода кислорода в конце плавки позволит обеспечить требуемое содержание углерода в металле на выпуске, что также положительно может отразиться на технико-экономических показателях плавки. Для обеспечения хорошего вспенивания шлака и снижения расхода электроэнергии рекомендуется удерживать общую окисленность шлака не более 25% ($\text{FeO} < 25\%$).

5.1.2. Рекомендации по отдаче извести

Учитывая чистоту ГБЖ по содержанию фосфора, процесс дефосфорации можно вести на пониженной основности (CaO/SiO_2) шлака в печи – на уровне нижнего предела рекомендованного состава шлака (около 2). Но, значительное 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:

$$Q_{\text{изв}} = A * (1-X) + B * Y/C * X \quad (5.1)$$

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

Например, при содержании диоксида кремния 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 при основности шлака равной 2 и содержании СаО в извести 90%. Формула не учитывает приход СаО из других добавляемых флюсовых материалов.

Для получения оптимальных технологических показателей рекомендуется использовать свежесожженную 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.

5.1.3. Рекомендации по отдаче MgO-содержащего флюса

Отдача MgO-содержащего флюса в ДСП осуществляется с целью 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 периклазоуглеродистого кирпича и другие материалы, содержащие оксид магния. Отдача данных материалов должна осуществляться таким образом, чтобы обеспечить содержание MgO в шлаке на уровне не менее 8% на протяжении всей плавки.

На рис. 5.1 на примере ДСП-150 представлены рекомендуемые расходы извести и MgO-содержащего флюса с целью поддержания заданной основности (на уровне 2) и содержания MgO в шлаке (на уровне 8%) в зависимости от доли ГБЖ в шихте.

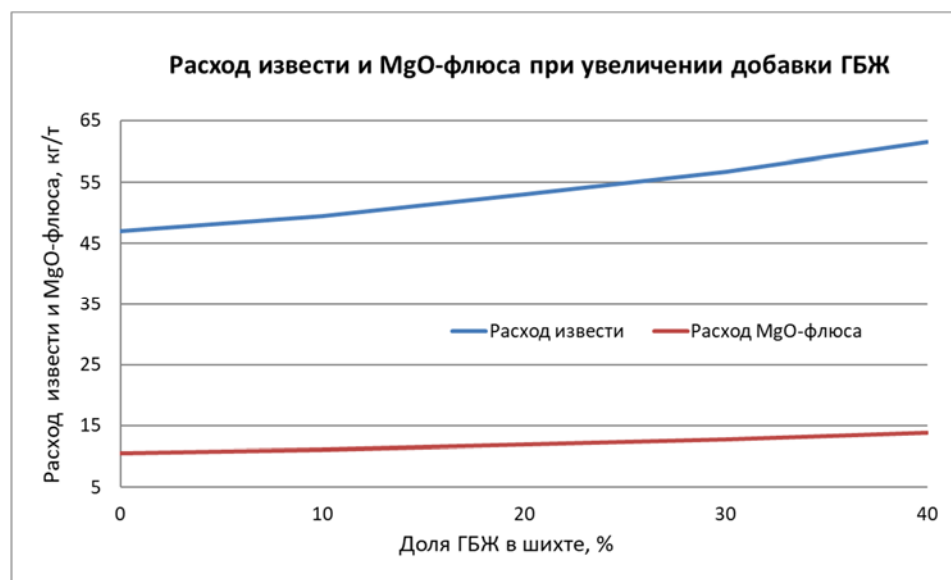


Рис. 5.1. Рекомендуемые расходы извести и MgO содержащего флюса для поддержания заданного химического состава шлака при увеличении доли ГБЖ в шихте.

5.1.4. Подварка (заправка) подины ДСП и торкретирование футеровки

Важно отметить, что длительность кампании футеровки, а именно стойкость кирпичной периклазоуглеродистой футеровки печи зависит в первую очередь от состояния откосов и подины печи, которые и являются основным рабочим слоем, контактирующим с жидким расплавом. В процессе эксплуатации печи необходимо постоянно контролировать уровень откосов и своевременно их подваривать (заправлять). Заправка подины и откосов в процессе кампании печи должна осуществляться высокомагнезильными массами с хорошими адгезионными свойствами. В процессе продолжительной эксплуатации заправочных масс установлено, что помимо качественных связующих, рекомендуемое содержание MgO в массах должно быть не менее 80%, CaO на уровне 12-16%. Отмечено, что при использовании подварочных масс с более низким содержанием оксида магния их расход значительно увеличивается. Это связано с плохим спеканием и растворением данных масс в жидкой ванне, о чем косвенно может свидетельствовать повышение содержания оксида магния в шлаке. После подварки (заправки) откосов печи необходимо произвести выдержку печи (5-7 минут) перед завалкой чтобы обеспечить гарантированное спекание заправочного материала.

В процессе эксплуатации печи необходимо своевременно торкретировать зоны повышенного локального износа рабочей футеровки. По возможности не допускать оголения поверхности кирпичной футеровки и поддерживать на ней защитный слой гарнисажа. Стойкость торкрет-слоя на футеровке обычно составляет 3-5 плавов. Учитывая опыт эксплуатации торкрет-масс отмечено, что оптимальное содержание MgO в торкрет-массе должно находиться на уровне не менее 85%, SiO_2 – не более 7%.

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

$$Q_{\text{масс}} = A * (1 + X / 100) \quad (5.2)$$

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

X – доля ГБЖ в шихте, %.

Таким образом, учитывая опыт обслуживания футеровки ДСП, при добавке каждые 10% ГБЖ, предлагается увеличивать расход подварочной и торкрет-массы на 10%.

Применительно к ДСП-150 ТАГМЕТ в данной работе предложена схема оценки ее плановой стойкости в зависимости от доли ГБЖ в завалке, основности шлака и расходов шлакообразующих и огнеупорных материалов для обслуживания футеровки.

5.1.5. Загрузка ГБЖ в ДСП-150

На стенах печи возможны образования больших настывлей, состоящих из шихты, содержащей ГБЖ, что связано с отсутствием в этой зоне достаточного количества тепла для их расплавления. Причиной этого может быть загрузка в печь повышенного количества ГБЖ и образование тугоплавких конгломератов, 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.

Оптимальным вариантом порционной 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 настывлей на стенах футеровки и водоохлаждаемых панелях печи, а также предотвратить локальные перегревы рабочего слоя футеровки.

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 местах повышенного износа футеровки. Рекомендуется рассмотреть возможность непрерывной подачи ГБЖ в печь, что позволит улучшить энерготехнологические показатели плавки и обеспечить стабильное поддержание пенистого шлака, при этом рекомендуемая температура полупродукта должна быть выше температуры ликвидуса на 50°C. Увеличение массы “болота” в печи позволит обеспечить быстрое и равномерное расплавление ГБЖ. В текущих условиях при порционной завалке оптимальным вариантом является послойный способ загрузки разнородной шихты в ДСП-150.

При порционной загрузке не рекомендуется отдача металлошихты с долей ГБЖ в завалке более 25-30 %.

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.

5.1.6. Дополнительные рекомендации при работе с ГБЖ

Вспенивание шлака в течение плавки позволяет защитить рабочую футеровку, образуя на ней слой гарнисажа и обеспечить экранирование дуги, что положительно отражается на технико-экономических показателях плавки. Важно обеспечить химический состав шлака такой, чтобы он не только хорошо пенился при вдувании углерода, но и был совместим с магнезиальными огнеупорами. По опыту разных работ, проведенных при выплавке стали в ДСП на разных металлургических предприятиях отмечено, что оптимальные показатели шлака, который обладает низким агрессивным воздействием на огнеупорную футеровку и обеспечивает формирование устойчивой шлаковой пены следующие: MgO – 8-12%, основность – около 2,0-3,0 при FeO – 15-30% [14, 46, 57, 66, 88, 89, 90].

Работа газокислородных фурм. Рациональное распределение подачи кислорода через газокислородные фурмы позволяет обеспечить равномерный износ рабочей футеровки печи по всему периметру. Рекомендуется проводить мероприятия по оценке воздействия работы фурм на локальный износ рабочей футеровки и, в случае необходимости, обеспечить перераспределения подачи кислорода на фурмы (увеличение / уменьшение давления), либо изменения угла наклона с целью более эффективного введения кислорода в расплав и снижения его воздействия на рабочую футеровку ДСП.

Выполнение предложенных рекомендаций позволит поддерживать стойкость футеровки печи на высоком уровне (1000 плавов и более) в том числе при работе ДСП с применением добавки ГБЖ в шихте.

5.2. Оценка экономической эффективности предложенных рекомендаций

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. 5.2). Также приведена приближенная экономическая оценка, включающая анализ затрат на огнеупорные и вспомогательные материалы при режиме

ведения плавки, учитывающем соблюдение предложенных выше рекомендаций на примере ДСП-150.

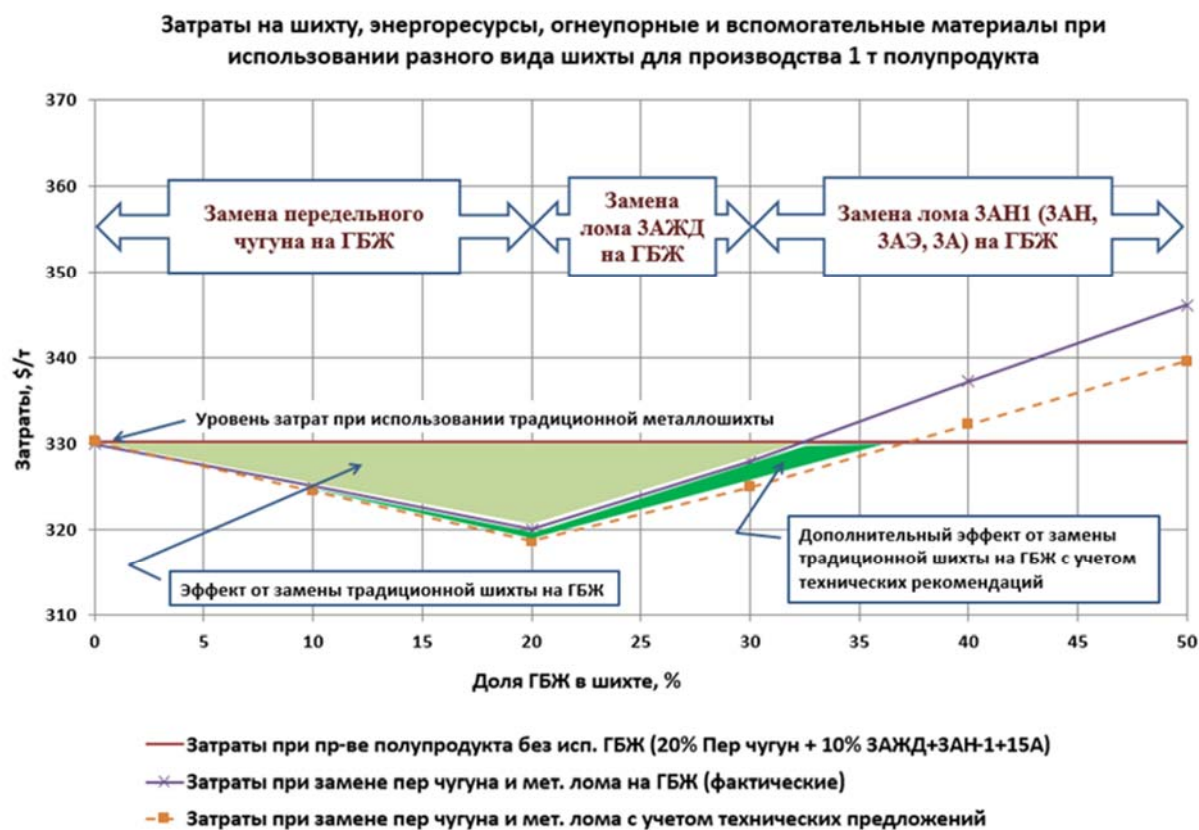


Рис. 5.2. Затраты на сырье, энергоресурсы, огнеупоры и вспомогательные материалы для производства 1 т полупродукта в ДСП-150.

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. Расчет затрат представлен в приложении Б.

Экономический эффект при использовании ГБЖ достигается за счет замены им дорогостоящего вида сырья. При замене в металлошихте дорогостоящего передельного чугуна на ГБЖ затраты на производство полупродукта снижаются. В данном случае затраты начинают расти при дальнейшей замене менее дорогого лома типа ЗАЖД 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. Дополнительный эффект при замене традиционной металлошихты на ГБЖ может быть получен при соблюдении предложенных технических рекомендаций по обслуживанию футеровки печи и ведению рационального шлакового режима, более благоприятного для футеровки ДСП. В этом случае доля ГБЖ может быть увеличена до 37%.

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% пердеельного чугуна на ГБЖ составляют около 12,6% (без учета потерь от выхода годного), на шихту – около 7,7%.

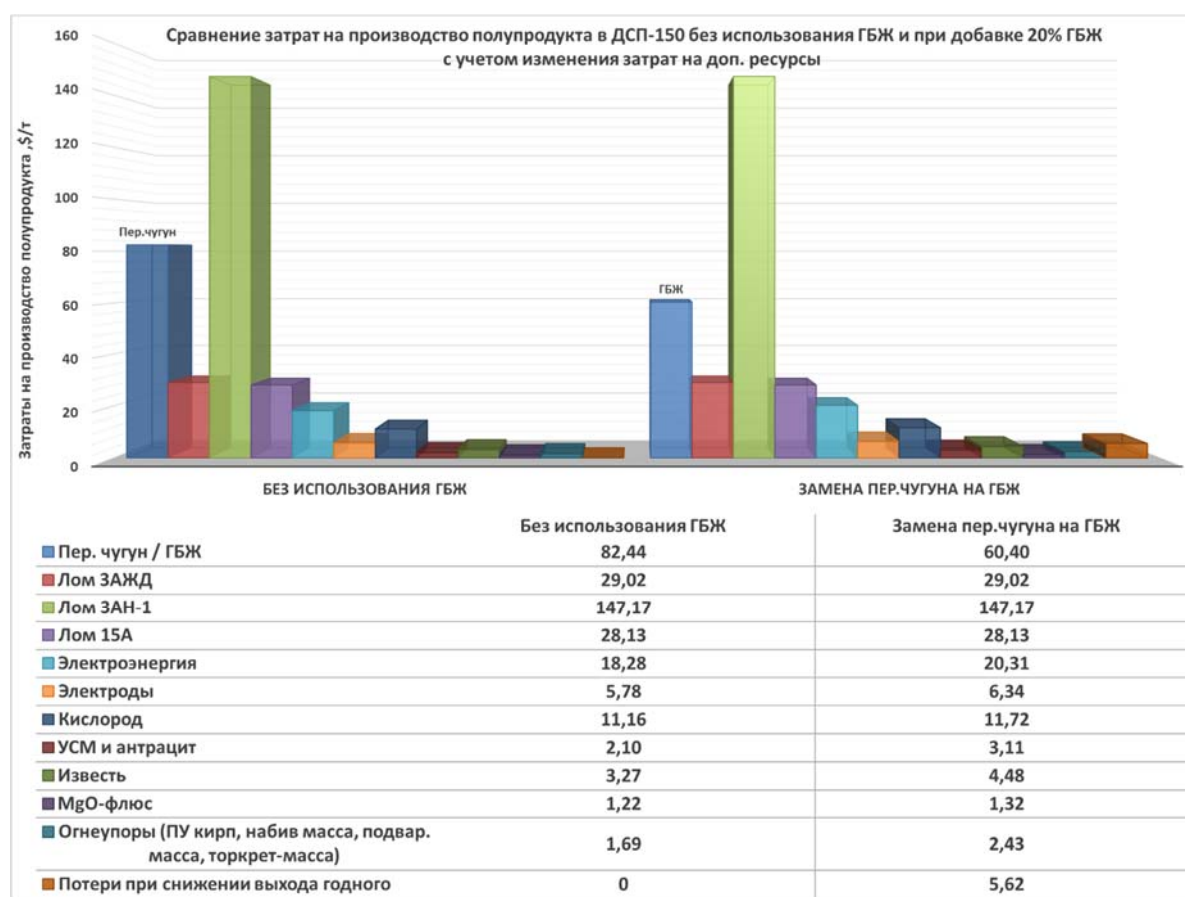


Рис. 5.3. Расчетные затраты на шихту и ресурсы для производства 1 т полупродукта при использовании традиционной металлошихты и при замене 20% пердеельного чугуна на ГБЖ.

В гистограммах и таблице на рис. 5.3 представлены расчетные затраты на шихту и ресурсы для производства 1 т полупродукта при использовании традиционной металлошихты и при замене 20% пердедельного чугуна на ГБЖ с учетом выхода годного. Видно, что экономический эффект получен за счет замены дорогостоящей металлошихты.



Рис. 5.4. Расчетные затраты на ресурсы для производства 1 т полупродукта при использовании традиционной металлошихты и при замене 20% пердедельного чугуна на ГБЖ.

В гистограммах и таблице на рис. 5.4 представлены расчетные затраты на ресурсы (энергоресурсы, шлакообразующие и огнеупорные материалы) для производства 1 т полупродукта при использовании традиционной металлошихты и замене 20% пердедельного чугуна на ГБЖ с учетом выхода годного. Видно, что основную статью затрат занимают затраты на потери от выхода годного и электроэнергию, расход которой увеличивается при повышении количества образующегося шлака, вызванным повышением доли ГБЖ в шихте.

5.3. Выводы по главе 5

Добавка ГБЖ в металлошихту оказывает влияние на характеристики печного шлака, что в свою очередь значительно отражается на стойкости периклазоуглеродистой

футеровки ДСП-150 и расходе огнеупорных магнезиальных масс для ее обслуживания. Проведенный анализ изменения химического состава шлака при использовании ГБЖ показывает необходимость корректировки его состава для поддержания его оптимальных характеристик по отношению к футеровке печи. На основе полученного опыта разработаны предложения по совершенствованию отдачи шлакообразующих добавок и огнеупорных материалов для обслуживания ДСП-150 в условиях использования ГБЖ с целью повышения стойкости футеровки. При разработке рекомендаций использовали опыт эксплуатации ДСП-150 на разных кампаниях футеровки печи с использованием ГБЖ на разных металлургических предприятиях.

При порционной загрузке не рекомендуется отдача металлошихты с долей ГБЖ в завалке более 25-30 %. В текущих условиях при порционной завалке оптимальным вариантом является послойный способ загрузки разнородной шихты в ДСП-150, что позволяет избежать образования крупных тугоплавких кластеров в печи.

При анализе имеющихся массивов плавков с использованием добавки ГБЖ было отмечено, что среднее содержание углерода в полупродукте находится на более низком уровне (0,06% при доле ГБЖ 23%) по сравнению с плавками на 100% металлическом ломе (0,08%). Среднее содержание оксидов железа в шлаке, а также окисленность стали при введении добавки ГБЖ находилось на более высоком уровне по сравнению с плавками с использованием 100% лома. Также при анализе зависимости содержания углерода в полупродукте от окисленности шлака установлено, что содержание углерода в полупродукте, при одном и том же содержании оксидов железа в шлаке, более низкое на плавках, произведенных с использованием ГБЖ в шихте по сравнению с плавками, произведенными с использованием 100% металлического лома. Таким образом, добавка ГБЖ в шихту позволяет достигать более низких значений содержания углерода за одно и то же время плавки, что открывает возможность снижения длительности плавки, расхода кислорода и увеличения производительности ДСП.

Учитывая чистоту ГБЖ по содержанию фосфора, процесс дефосфорации можно вести на пониженной основности (CaO/SiO_2) шлака в печи – на уровне нижнего предела рекомендованного состава шлака (около 2). Но, значительное 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 предложенной формуле, учитывающей долю ГБЖ в шихте.

Приведена оценка экономической целесообразности использования ГБЖ при замене им дорогостоящего вида сырья и 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. Также приведена приближенная экономическая оценка, включающая анализ затрат на огнеупорные и вспомогательные материалы при режиме ведения плавки, учитывающем соблюдение предложенных выше технических рекомендаций на примере ДСП-150, которая показывает экономический эффект.

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. Дополнительный эффект при замене традиционной металлошихты на ГБЖ может быть получен при соблюдении предложенных технических рекомендаций по обслуживанию футеровки печи и ведению рационального шлакового режима, более благоприятного для футеровки ДСП. В этом случае доля ГБЖ может быть увеличена до 37%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе изучены особенности применения перспективного материала – горячебрикетированного железа производства ОАО “Лебединский ГОК” в металлошихте дуговых электропечей, работающих на твердой завалке и имеющих порционную загрузку шихты.

Проведенный литературный обзор показывает, что основное преимущество использования металлизированного сырья, в том числе и ГБЖ заключается в том, что качество получаемого полупродукта по содержанию вредных примесей находится на более высоком уровне по сравнению с полупродуктом, получаемым при использовании 100% металлического лома. Это связано с чистотой такого сырья по вредным примесям.

Отмечено, что в литературе отсутствует в полной мере количество исследований, направленных на влияние ГБЖ на технологические показатели плавки и стойкость футеровки ДСП повышенной вместимости, имеющую порционную загрузку шихты и

работающей на твердой завалке. Присутствуют и противоречивые взгляды на влияние ГБЖ на технологические показатели плавки. Это обуславливает интерес к проведению исследований в этой области. В связи с этим была поставлена задача исследования влияния ГБЖ на технологические показатели плавки в условиях ДСП-150 с порционной загрузкой шихты на металлургических заводах России.

Во второй главе представлена характеристика промышленной ДСП, вместимостью 150 т, работающей на твердой завалке, описана схема футеровки печи. Указаны требования к производимому полупродукту и показаны характеристики используемых сырьевых материалов. Представлена схема распределения металлошихты, содержащей ГБЖ в загрузочной бадье. Показана характеристика применяемых изделий для футеровки ДСП-150 и огнеупорных материалов для ее обслуживания. Описана технология выплавки стали в ДСП-150 в условиях использования ГБЖ. Показан плановый энерготехнологический режим выплавки полупродукта.

В третьей главе 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 находится 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. 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 несплавившегося ГБЖ в смеси с нерастворившимися известью, коксом и ломом. Искусственное создание такого гарнисажного слоя позволит защитить футеровку печи, повысить ее стойкость и снизить расход огнеупорных материалов для ее обслуживания. Показан состав настыва, образующейся при порционной загрузке большого количества ГБЖ (51 т, 36%) в ДСП-150, и извлеченной из печи после окончания кампании футеровки.

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 кластеров в ванне ДСП, состоящих преимущественно из ГБЖ и предотвратить образование тугоплавких конгломератов в ванне печи, избежать образования крупных настывей на стенах футеровки и водоохлаждаемых панелях печи, а также предотвратить локальные перегревы рабочего слоя футеровки.

Анализ плавов показывает, что увеличение добавки ГБЖ приводит к повышению расхода основных энерготехнологических показателей плавки, а также к повышению расхода шлакообразующих материалов в ДСП-150, что обусловлено наличием оксидов железа в ГБЖ, на восстановление которых необходимы дополнительные энергетические затраты. Наличие пустой породы в брикетах увеличивает количество шлака в печи и снижает коэффициент электропроводности шихты, что также отражается на расходе электроэнергии. Так, 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%).

В условиях ДСП-150 ВТЗ проведен анализ влияния добавки ГБЖ на содержание углерода в полупродукте и окисленность металла и шлака. 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. Показано, что содержание углерода в полупродукте, при одном и том же содержании оксидов железа в шлаке, ниже на плавках, произведенных с использованием ГБЖ в шихте по сравнению с плавками, произведенными с использованием 100% металлического лома. Таким образом, на примере анализируемых массивов плавов показано, что добавка ГБЖ в шихту позволяет достигать более низких значений содержания углерода за одно и то же время плавки, что открывает возможность снижения длительности плавки, расхода кислорода и увеличения производительности ДСП.

На примере анализа существующих массивов плавов было показано, что применение добавки ГБЖ в завалке при выплавке стали в ДСП-150, позволяет получать полупродукт с пониженным содержанием фосфора. Например, в условиях выплавки стали в ДСП-150 ВТЗ при поддержании основности шлака на одном уровне при

увеличении доли ГБЖ в шихте с 0 до 27 % отмечено снижение фосфора с 0,012 до 0,006 % (в 2 раза). Снижение концентрации фосфора в металле при увеличении доли ГБЖ в шихте обусловлено чистотой ГБЖ по фосфору, а также протеканием процесса дефосфорации в условиях повышенной окисленности системы металл-шлак при увеличении доли ГБЖ.

При увеличении доли ГБЖ в шихте с 0 до 25 % фактический коэффициент распределения фосфора между шлаком и металлом возрастает с 16 до 25, равновесный коэффициент возрастает с 43 до 67. Но учитывая разброс показателей процесс распределения фосфора при увеличении доли ГБЖ становится менее стабильный. Разброс данных связан с нестабильностью шлакового режима, обусловленным повышенным количеством образующегося шлака, малым временем его формирования, изменением его вязкости в связи с добавкой извести для поддержания заданной основности и с ограниченным временем плавления добавок извести и флюса. В целом характер протекания процесса дефосфорации подчиняется законам термодинамики. Закономерности протекания процесса дефосфорации при использовании ГБЖ в шихте соответствуют процессам дефосфорации, протекающих при работе ДСП на 100 % металлическом ломе.

Увеличение добавки ГБЖ в завалке при выплавке стали в ДСП-150 позволяет получать полупродукт с пониженным содержанием примесей цветных металлов, таких как медь, никель, хром, олово и др. Это связано с чистотой ГБЖ по данным примесям. Благодаря точно известному однородному химическому составу ГБЖ появляется возможность повышения вероятности попадания в заданную марку стали и снижения уровня брака при производстве полупродукта.

Для анализа изменения содержания примесей цветных металлов в получаемом полупродукте при увеличении доли ГБЖ в шихте были построены диаграммы с аппроксимирующими графиками. Для построения диаграмм использовали программный пакет STATISTICA и Microsoft Excel. Разброс данных обусловлен колебанием примесей цветных металлов в используемом металлическом ломе.

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.

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 связи с этим также была приведена приблизительная экономическая оценка замены металлического лома на ГБЖ при выплавке стали в ДСП-150. Относительно низкая стоимость ГБЖ, по сравнению с передельным чугуном и дорогостоящим видом лома, делает привлекательным его использование в качестве шихтового материала даже несмотря на увеличение расходов энерготехнологических показателей плавки и снижение стойкости рабочей футеровки печи. Большой экономический эффект дает замена передельного чугуна на ГБЖ в связи с высокой стоимостью данного сырья. На примере анализируемого массива плавов с использованием ГБЖ в шихте (среднее содержание 12,9 %) в условиях выплавки стали в ДСП-150 показан приблизительный экономический эффект, который составил при замене ЗАЖД лома на ГБЖ - 96\$ за плавку, при замене передельного чугуна на ГБЖ - 2616\$ за плавку.

В четвертой главе показано изменение стойкости футеровки ДСП-150 и расхода огнеупорных материалов для ее обслуживания при увеличении добавки ГБЖ. На металлургических предприятиях отмечено значительное снижение стойкости футеровки промышленных печей при использовании ГБЖ. На примере ДСП-150 ВТЗ построен график зависимости стойкости периклазоуглеродистой футеровки печи от доли ГБЖ в шихте. При увеличении доли ГБЖ в шихте на 10 % снижение стойкости рабочего слоя футеровки может составлять около 400 плавов, что обусловлено изменением характеристик печного шлака.

Предложена схема оценки плановой стойкости футеровки ДСП в зависимости от доли ГБЖ в завалке, основности шлака и расходов шлакообразующих и огнеупорных материалов для обслуживания футеровки.

Проведен анализ влияния повышения добавки горячебрикетированного железа в завалке на химический состав шлака в печи. Отмечено повышение окисленности шлака при использовании добавки ГБЖ, а также построена зависимость, показывающая увеличение количества шлака при увеличении доли ГБЖ. Все это повлияло на увеличение удельного расхода электроэнергии, вводимой в печь и негативно отразилось на износе футеровки печи. Показаны состояния футеровки при работе на печных шлаках с разным химическим составом.

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.

В пятой главе на основе полученного опыта разработаны предложения по совершенствованию отдачи шлакообразующих добавок и огнеупорных материалов для обслуживания ДСП-150 в условиях использования ГБЖ с целью повышения стойкости футеровки. При разработке рекомендаций использовали опыт эксплуатации ДСП-150 на разных кампаниях футеровки печи с использованием ГБЖ на разных металлургических предприятиях.

При порционной загрузке не рекомендуется отдача металлошихты с долей ГБЖ в завалке более 25-30 %. В текущих условиях при порционной завалке оптимальным вариантом является послойный способ загрузки разнородной шихты в ДСП-150, что позволяет избежать образования крупных тугоплавких кластеров в печи.

При анализе имеющихся массивов плавов с использованием добавки ГБЖ было отмечено, что среднее содержание углерода в полупродукте находится на более низком уровне (0,06% при доле ГБЖ 23%) по сравнению с плавками на 100% металлическом ломе (0,08%). Среднее содержание оксидов железа в шлаке, а также окисленность стали при введении добавки ГБЖ находилось на более высоком уровне по сравнению с плавками с использованием 100% лома. Также при анализе зависимости содержания углерода в полупродукте от окисленности шлака установлено, что содержание углерода в полупродукте, при одном и том же содержании оксидов железа в шлаке, более низкое на плавках, произведенных с использованием ГБЖ в шихте по сравнению с плавками, произведенными с использованием 100% металлического лома. Таким образом, добавка ГБЖ в шихту позволяет достигать более низких значений содержания углерода за одно и то же время плавки, что открывает возможность снижения длительности плавки, расхода кислорода и увеличения производительности ДСП.

Учитывая чистоту ГБЖ по содержанию фосфора, процесс дефосфорации можно вести на пониженной основности (CaO/SiO_2) шлака в печи – на уровне нижнего предела рекомендованного состава шлака (около 2). Но, значительное 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 предложенной формуле, учитывающей долю ГБЖ в шихте.

Предложена методика оценки затрат на производство 1 т полупродукта при замене дорогостоящего вида сырья на ГБЖ и построены зависимости, показывающие затраты 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. Также приведена приближенная экономическая оценка, включающая анализ затрат при режиме ведения плавки, учитывающем соблюдение предложенных выше технических рекомендаций на примере ДСП-150, которая показывает экономический эффект.

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. Дополнительный эффект при замене традиционной металлошихты на ГБЖ может быть получен при соблюдении предложенных технических рекомендаций по обслуживанию футеровки печи и ведению рационального шлакового режима, более благоприятного для футеровки ДСП. В этом случае доля ГБЖ может быть увеличена до 37%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айзатулов Р.С., Харлашин П.С., Протопопов Е.В., Назюта Л.Ю. Теоретические основы сталеплавильных процессов. М.: МИСиС, 2004. 320 с.
2. Аксельрод Л.М. Качественные и количественные изменения в производстве огнеупорных материалов в СНГ в 2000 – 2020 гг. // Сборник трудов 11 конгресса сталеплавильщиков. 2011. С. 77-90.
3. Аксельрод Л.М. Огнеупоры для сталеплавильного производства, в том числе периклазоуглеродистые: доступность, стойкость, экономика, экология. // Сборник трудов 13 конгресса сталеплавильщиков. 2014. С. 42-48.
4. Аксельрод Л.М., Кушнерев И.В., Сухарев С.В., Заболотский А.В. Производство чистой стали и современные огнеупорные технологии. // Новые огнеупоры. 2017. № 7. С. 3-11.
5. Аксельрод Л.М., Турчин М.Ю., Вислогузова Э.А., Левчук В.В., Ремиго С.А. Практика применения высокомагнезиальных флюсов для модификации конвертерного шлака 160-тонных конвертеров ОАО “НТМК”. // Сборник трудов 11 конгресса сталеплавильщиков. 2011. С. 153-157.
6. Алленштейн Й. и др. Огнеупорные материалы. Структура, свойства, испытания. М.: Интермет Инжиниринг, 2010. 392 с.
7. Амелин А.В., Протопопов Е.В., Калиногорский А.Н., Фейлер С.В. Формирование гарнисажа магнезиальных шлаков на футеровке большегрузных конвертеров. // Сталь. – 2014. № 7. С.22-25.
8. Аникин А.Е., Галевский Г.В., Руднева В.В., Галевский С.Г. Металлизация оксиджелезосодержащих отходов металлургического производства. // Сборник трудов 14 конгресса сталеплавильщиков. 2016. С. 608-614.
9. Бабенко А. А. и др. Формирование магнезиальных шлаков по периодам плавки в ДСП и их роль в эффективности вспенивания шлака // Сборник трудов 12 Конгресса сталеплавильщиков. — М.: Metallurgizdat, 2013. С. 106–109.
10. Бабенко А.А., Мухранов Н.В., Левчук В.В., Кривых Л.Ю., Савельев М.В., Ремиго С.А. Исследование фазового состава конвертерных магнезиальных шлаков и управление процессом формирования износоустойчивого гарнисажа. // Сборник трудов 11 конгресса сталеплавильщиков. 2011. С. 136-141.
11. Бабенко А.А., Смирнов Л.А., Витущенко М.Ф., Богомолов В.И., Добромиллов А.А. и др. Комплекс технологических приемов повышения стойкости футеровки

конвертеров при переделе фосфористых чугунов. // Сборник трудов 13 конгресса сталеплавателей. 2014. С. 114-118.

12. Бабенко А.А., Смирнов Л.А., Михайлова Л.Ю., Ушаков М.В., Спирин С.А. Теоретические основы и технология плавки в кислородных конвертерах и ДСП под магнезиальными шлаками. // Сборник трудов 14 конгресса сталеплавателей. 2016. С. 157-162.
13. Бабенко А.А., Смирнов Л.А., Фомичев М.С., Данилин Ю.А., Кривых Л.Ю., Мухранов Н.В., Левчук В.В., Савельев М.В., Ремиго С.А. Повышение стойкости футеровки конвертеров при переделе углеродистого полупродукта на сталь. // Черная металлургия. – 2013. № 8. С. 59-62.
14. Бабенко А.А., Ушаков М.В., Мурзин А.В., Смирнов Л.А., Бурмасов С.П., Селиванов Е.Н., Спирин С.А., Степанов А.И., Житлухин Е.Г. Химический и фазовый состав магнезиальных шлаков, формируемых в ДСП, и их роль в эффективности вспенивания шлака. // Сборник трудов 13 конгресса сталеплавателей. 2014. С. 159-163.
15. Бабенко А.А., Фомичев М.С., Мухранов Н.В., Левчук В.В., Кривых Л.Ю., Савельев М.В., Ремиго С.А. Освоение технологии формирования гарнисажа на базе магнезиальных шлаков средне- и высокоуглеродистого металла. // Сборник трудов 11 конгресса сталеплавателей. 2011. С. 127-130.
16. Белковский А.Г. реф. Обзор материалов конференции ассоциации доменщиков и сталеплавателей – AISTech 2014. Секция “электросталеплавильное производство”. Часть 1., Часть 2. // Новости черной металлургии за рубежом. 2015. № 4. С. 26-33, № 5. С.26-37.
17. Белковский А.Г., Кац Я.Л. Обоснование и расчет оптимального содержания углерода в шихте ДСП. // Сборник трудов 11 конгресса сталеплавателей. 2011. С. 226-233.
18. Белковский А.Г., Кац Я.Л., Краснянский М.В. Современное состояние и тенденции развития технологии производства стали в ДСП и их конструкции. // Черная металлургия. – 2013. № 3. С.72-88.
19. Белковский А.Г., Кац Я.Л., Сивак Б.А., Пасечник Н.В. Рационализация конструкции ДСП по типу применяемой шихты и способам ее загрузки. // Черная металлургия. – 2013. № 7. С.24-29.

20. Белковский А.Г., Краснянский М.В., Кац Я.Л. Повышение эффективности производства стали на электрометаллургических заводах малой производительности. // Черная металлургия. – 2015. № 2. С. 40-48.
21. Бигеев А.М., Бигеев В.А. Металлургия стали / Магнитогорск: МГТУ, 2000. 544 с.
22. Бигеев В.А., Колесников Ю.А., Сергеев Д.С., Потапова М.В., Писчаскина А.В. Технологическая оценка результатов реструктуризации металлошихты сталеплавильных агрегатов. // Сборник трудов 14 конгресса сталеплавильщиков. 2016. С. 143-147.
23. Бигеев В.А., Малофеев А.Е., Пантелеев А.В., Федянин А.Н., Брусникова А.В. Окисленность шлака современной дуговой сталеплавильной электропечи. // Черная металлургия. – 2013. № 6. С.22-24.
24. Бирюков А.Б., Сафьянц С.М. Анализ технологии производства железа прямого восстановления ITmk3. // Черная металлургия. – 2016. №10. С.21-27.
25. Бойченко С.Б., Васильев Д.П., Бойченко Б.М., Молчанов Л.С. Износ периклазоуглеродистых огнеупоров в конвертере при изменении типа их антиоксидантов. // Черная металлургия. – 2016. № 5. С.57-60.
26. Бондаренко И.А. Турыгин А.К., Артамошин А.Л., Венгура А.В., Феклистов А.В., Данилов Д.В. Повышение стойкости футеровки тепловых агрегатов при использовании обожженного магнезиально-известкового флюса в условиях ОАО “БМЗ”. // Литье и металлургия. 2013. № 2. С. 78-81.
27. Буданов И.А. Влияние противоречий Российской экономики на развитие металлургического комплекса. // Сталь. 2017. № 9. С. 62-69.
28. Бухебнер Г., Ханна А., Хохеггер М., Цеттль К.-М. Последние достижения в области периклазоуглеродистых огнеупоров для современных электродуговых печей. // Новые огнеупоры. 2017. № 11. С. 15-21.
29. Величко А.Г., Бойченко Б.М., Низяев К.Г., Стоянов А.Н., Синегин Е.В. Влияние шлаковых режимов на технологические показатели конвертерной плавки. // Сборник трудов 11 конгресса сталеплавильщиков. 2011. С. 193-196.
30. Возчиков А.П., Демидов К.Н., Борисова Т.В., Носенко В.И., Филатов А.Н. Применение высокомагнезиального флюса Флюмаг в сталеплавильном производстве. // Сталь. 2017. № 4. С. 16-20.

31. Воронов Г.В., Гольцев В.А., Глухов И.В., Плесакин И.В. К вопросу о рациональной загрузке шихтовых материалов и расположении топливосжигающих устройств в ДСП-120. // Черная металлургия. – 2017. № 4. С.45-49.
32. Грейс П. Предварительно восстановленные материалы и их использование в Европе // Черные металлы. 1997. № 6. С. 8–13.
33. Григорян В. А., Белянчиков Л. Н., Стомахин А. Я. Теоретические основы электросталеплавильных процессов. — М.: Металлургия, 1987. — С. 159-163.
34. Гришин А.А. Исследование режима плавления металлизированных окатышей в ванне дуговой печи с целью интенсификации процесса электроплавки стали. Дис. канд. тех. наук. Москва. 2006. 162 с.
35. Гузман И.Я. Химическая технология керамики. М.: ООО РИФ «Стройматериалы». 2003. 496 с.
36. Гурова С.А., Кондратов Л.А. О производстве стальных труб. // Сталь. 2016. № 7. С. 47-52.
37. Демидов К.Н., Климов А.В., Борисова Т.В. Оценка растворимости оксида магния в шлаке по ходу продувки конвертерной плавки. // Сборник трудов 11 конгресса сталеплавильщиков. 2011. С. 145-149.
38. Дорофеев Г.А. Перспективы применения синтетических композиционных материалов в электродуговых печах. // Сталь. 2015. № 10. С. 13-16.
39. Дорофеев Г.А., Янговский П.Р., Степанов Я.М., Зинягин Г.А., Ламухин А.М., Просвиркин С.П., Щивка Е. Энергоэффективность дуговых сталеплавильных печей и перспективы применения композиционных технологических материалов. // Сборник трудов 13 конгресса сталеплавильщиков. 2014. С. 87-92.
40. Егизарьян Д.К., Шаманов А.Н., Шешуков О.Ю., Некрасов И.В., Метелкин А.А., Овчинникова Л.А. Технологические свойства и вязкость ковшевых шлаков. // Сборник трудов 13 конгресса сталеплавильщиков. 2014. С. 219-223.
41. Еланский Д.Г. Техника-технология-люди, - где резервы российских заводов? // Сборник трудов 13 конгресса сталеплавильщиков. 2014. С. 33-37.
42. Еланский Д.Г., Гроссе А., Опферман А., Баумгартнер С., Шмитт М. Повышая эффективность использования энергии. // Сборник трудов 13 конгресса сталеплавильщиков. 2014. С. 73-76.
43. Железо – в брикеты. Электронный ресурс <http://www.metalika.ru/articles/zhelezo-v-brikety.html> Дата доступа 20.02.2018.

44. Зиновьева Н.Г. реф. Использование губчатого железа в металлургии Индии // Черная металлургия. – 2016. № 3. С.135.
45. Зинуров И.Ю., Конюченко Г.А. Дуговые сталеплавильные печи с плоской ванной. // Черная металлургия. – 2018. № 3. С.47-51.
46. Зуев М.В., Бабенко А.А., Бурмасов С.П. и др. Комплекс технологических и технических решений снижения энерго- и материалоемкости процесса выплавки стального полупродукта в современных ДСП. // Сборник трудов 13 конгресса сталеплавильщиков. 2014. С. 54-58.
47. Зуев М.В., Бурмасов С.П., Гудов А.Г., Мурзин А.В., Кузякин В.Г. Исследование и оптимизация технологии науглероживания стали при выплавке с использованием полупродукта ДСП. // Сталь. 2014. № 6. С. 25-30.
48. Зуев М.В., Бурмасов С.П., Мурзин А.В., Степанов А.И., Гудов А.Г., Житлухин Е.Г., Ушаков М.В., Пузакова Е.В. Исследование окисленности полупродукта и качества металла при производстве трубных сталей современным дуговым процессом. // Сборник трудов 11 конгресса сталеплавильщиков. 2011. С. 211-215.
49. Калиш Д., Синельников В.О., Куглин К. Исследования физико-химических свойств шлака при его разбрызгивании на футеровку кислородного конвертера. // Новые огнеупоры. 2017. № 3. С. 78-83.
50. Каризанги С.Г., Немати А., Шахраки А. Влияние нанодобавки Fe_2O_3 на плотность и стойкость к гидратации $MgO-CaO$ -огнеупоров. // Новые огнеупоры. 2016. № 5. С. 49-53.
51. Касьян Г.И., Павленко А.В., Попик Н.И., Кодак А.В. Опыт использования железа горячебрикетированного в шихтовке плавок современной высокопроизводительной электродуговой печи в условиях ЭСПЦ АО (частное) “ДЭМЗ”. // Сборник трудов 11 конгресса сталеплавильщиков. 2011. С. 255-259.
52. Качество стали, выплавленной с использованием металлизированного сырья. Электронный ресурс <http://metal-archive.ru/ispolzovanie-zheleza/938-kachestvo-stali-vyplavlennoy-s-ispolzovaniem-metallizovannogo-syrya.html>. Дата доступа 15.08.2017.
53. Кашеев И. Д. Оксидноуглеродистые огнеупоры. — М. : Интермет Инжиниринг, 2000. — 265 с.
54. Кашеев И.Д., Земляной К.Г., Чевычелов А.В., Валуев А.Г., Поморцев С.А. Периклазоуглеродистые огнеупоры, сформованные новым способом. // Новые огнеупоры. 2017. № 4. С. 17-19.

55. Кашеев И.Д., Стрелов К.К., Мамыкин П.С. Химическая технология огнеупоров. М.: Интермет Инжиниринг, 2007. 752 с.
56. Кожухов А.А. Оценка устойчивости процесса вспенивания сталеплавильного шлака с точки зрения теории протекания и фрактальной геометрии. // Сборник трудов 13 конгресса сталеплавыльщиков. 2014. С. 98-105.
57. Кожухов А.А. Развитие научных основ вспенивания сталеплавильных шлаков с целью повышения энерготехнологических показателей производства стали в дуговых сталеплавильных печах. Дис. докт. тех. наук. Москва. 2015. 374 с.
58. Кожухов А.А., Кожухова В.И. К вопросу об оценке способности сталеплавильных шлаков пениться. // Сборник трудов 14 конгресса сталеплавыльщиков. 2016. С. 123-126.
59. Кожухов А.А., Семин А.Е., Котельников Г.И. Исследование условий и факторов образования вспененных шлаков в дуговой сталеплавильной печи. // Сборник трудов 13 конгресса сталеплавыльщиков. 2014. С. 93-98.
60. Коровин Б.М., Громков В.Ю., Куликов В.В., Шепелев Д.С., Арсланов В.Г. Интенсификация процесса выплавки стали в дуговой электропечи. // Черная металлургия. – 2015. № 5. С.19-21.
61. Коростелев А.А., Котельников Г.И., Семин А.Е., Божесков А.Н. и др. Анализ влияния добавки горячебрикетированного железа в завалке на технологические показатели плавки в электропечи. // Черные металлы. 2017. № 10. С. 33-40.
62. Коростелев А.А., Семин А.Е., Котельников Г.И., Емельянов В.В., Мурзин И.С. Использование горячебрикетированного железа при выплавке стали в дуговой сталеплавильной печи // Черные металлы -2018. - № 3. С. 18 – 23.
63. 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 горячебрикетированного железа в шихте. // Черная металлургия. - 2017. - № 11. С. 77 – 86.
64. Коростелев А.А., Съемщиков Н.С., Семин А.Е., Котельников Г.И. Мурзин И.С., Емельянов В.В., Колоколов Е.А., Белоножко С.С. Повышение стойкости футеровки ДСП при использовании ГБЖ в завалке. // Новые огнеупоры. - 2018. - № 3. С. 3 – 10.
65. Корунов И.Ф. Современное состояние и ожидаемые мировые тенденции развития металлургии железа. // Черная металлургия. – 2017. №2. С.3-10.

66. Красильников В.О., Зубаков Л.В., Ушаков М.В., Петров С.М., Головня А.А., Сельчук М.Ф. Передовые технологии эксплуатации футеровки электросталеплавильной печи на примере ДСП-135 ОАО “Северский трубный завод”. // Сталь. 2014. № 6. С. 31-34.
67. Красильников В.О., Зубаков Л.В., Ушаков М.В., Петров С.М., Головня А.А., Сельчук М.Ф. Передовые технологии эксплуатации футеровки электросталеплавильной печи на примере ДСП-135 ОАО “Северский трубный завод”. // Сборник трудов 13 конгресса сталеплавателей. 2014. С. 109-114.
68. Крахт Л.Н., Меркер Э.Э., Кем А.Ю., Степанов В.А. Металлизированные железорудные окатыши и повышение эффективности их применения при электроплавке стали в дуговой печи. // Вестник ДГТУ, 2015. № 3. С. 35-40.
69. Кудрин В.А. Теория и технология производства стали. М.: “Мир”, ООО “Издательство АСТ”. 2003. 528 с.
70. Кузнецов М.С. Исследование процессов рафинирования металлического расплава от азота и водорода с целью совершенствования технологии производства низколегированной стали. Дис. канд. тех. наук. Москва. 2011. 191 с.
71. Кузьменко А.Г., Фролов Ю.Ф., Поздняков М.А., Корнев В.Н., Фоменко А.П., Саутин С.Д. Технология и электропечи Consteel: перспективы применения в отечественной металлургии. // Сталь. 2016. № 4. С. 16-21.
72. Логунова О.С., Сибилева Н.С., Павлов В.В. Интеллектуальная поддержка формирования структуры шихты для плавки в дуговой сталеплавильной печи. // Сталь. 2016. № 10. С. 20-24.
73. Люкхоф Я., Апфель Й., Буттлер Й. Использование различных видов металлошихты в электросталеплавильном производстве. // Черные металлы. 2017. № 10. С. 28-33.
74. Маймур Б.Н., Худяков А.Ю., Петренко В.И., Ващенко С.В., Баюл К.В. Брикетирование металлургического сырья. Актуальность и пути развития метода// Черная металлургия. – 2016. №1. С.74-81.
75. Малофеев А.Е., Пантелеев А.В., Федянин А.Н., Брусникова А.В. Использование железосодержащего материала с разной степенью металлизации в качестве компонента шихты дуговой сталеплавильной электропечи. // Сборник трудов 11 конгресса сталеплавателей. 2011. С. 222-224.
76. Меркер Э.Э., Кочетов А.И., Харламов Д.А. Энергосбережение при выплавке стали в дуговых печах. // Учебное пособие. - Старый Оскол: ТНТ, 2009. - 296 с.

77. Меркер Э.Э., Крахт Л.Н., Королькова Л.Н., Черменев Е.А., Степанов В.А. Исследование процессов нагрева и плавления железорудных окатышей при их подаче в подэлектродовое пространство дуговой печи. // Вестник Череповецкого государственного университета. 2015. № 6. С. 26-30.
78. Меркер Э.Э., Крахт Л.Н., Степанов В.А., Ершов Е.В., Королькова Л.Н. Разработка метода распределенного режима дожигания горючих газов в дуговой сталеплавильной печи с применением железорудного сырья. // Черная металлургия. – 2018. № 2. С. 48-52.
79. Меркер Э.Э., Малахова О.И., Крахт Л.Н., Казарцев В.О. Теплоэнергетические особенности электроплавки железорудных металлизированных окатышей в дуговой сталеплавильной печи. // Сталь. 2017. № 3. С. 22-26.
80. Меркер Э.Э., Черменев Е.А. Математическая модель обезуглероживания металла при электроплавке железорудных окатышей в дуговой печи. // Сталь. – 2014. № 3. С.28-32.
81. Меркер Э.Э., Черменев Е.А., Степанов В.А., Киселева Н.А. Повышение энергоэффективности электроплавки металлизированных окатышей при пониженном угаре металла в дуговой печи. // Черная металлургия. – 2014. № 8. С.36-40.
82. Митина Н.А., Лотов В.А. Исследование изменения фазового состава, свойств и гидравлической активности при термической обработке магниевых материалов. // Новые огнеупоры. 2017. № 5. С. 53-59.
83. Михайлов О.Ю., Тарасенко Я.В. Золотой юбилей железорудного гиганта России. // Черная металлургия. – 2017. № 7. С.15-17.
84. Мурзин А.В. Разработка технологии науглероживания металла при выплавке трубных сталей с использованием полупродукта ДСП. Дис. канд. тех. наук. Екатеринбург. 2016. 186 с.
85. Мысик В.Ф., Жданов А.В., Тимофеев М.О., Степанов А.И., Тимофеев О.В., Кузякин В.Г. Оценка качества лома и его влияния на работу ДСП. // Сборник трудов 13 конгресса сталеплавателей. 2014. С. 132-135.
86. Мысик В.Ф., Жданов А.В., Тимофеев М.О., Шартдинов Р.Р. Чугун и сталь как источники загрязнения медью. // Черная металлургия. – 2017. № 4. С.41-45.
87. Наль О., Долапчиолу С., Партыка А., Миани С., Готтарди Р., Крассиг Х.-Й. Завалка одной бадьей в ДСП с телескопической конструкций свода. // Сборник трудов 14 конгресса сталеплавателей. 2016. С. 226-238.

88. Некрасов И.В. Разработка рационального режима плавки стального полупродукта в сверхмощных дуговых электропечах. Дис. канд. тех. наук. Екатеринбург. 2010. 148 с.
89. Некрасов И.В., Шешуков О.Ю., Метелкин А.А., Сивцов А.В., Цымбалист М.М. Обзор исследований по шлаковому режиму электропечей. // Сталь. 2016. № 6. С. 28-35.
90. Некрасов И.В., Шешуков О.Ю., Невидимов В.Н., Истомин С.А. Оценка вязкости гетерогенных шлаков расчетными методами. // Сборник трудов 11 конгресса сталеплавильщиков. 2011. С. 141-145.
91. Никитченко Т.В., Поляков А.С., Тимофеева А.С. Увеличение прочности горячебрикетированного железа за счет изменения его формы. // Черная металлургия. – 2017. № 11. С.52-56.
92. Николаев А.А., Корнилов Г.П., Ануфриев А.В., Пехтерев С.В., Повелица Е.В. Оптимизация электрических режимов сверхмощных дуговых сталеплавильных печей. // Сталь. – 2014. № 4. С.37-47.
93. Очагова И.Г. Влияние антиоксидантов на свойства периклазоуглеродистых огнеупорных изделий. // Новости черной металлургии за рубежом. – М.: АО «ЦНИИ ЧМ». 1997. № 2. С. 146-152.
94. Ошурков В.А., Логунова О.С., Павлов В.В., Чистяков Д.В., Панов А.Н., Щebleва Ю.В. Влияние фракционности металлического лома на вероятность возникновения очагов “кострения” в ДСП. // Сталь. 2017. № 9. С. 14-20.
95. Павлов В.В., Логунова О.С., Павлов И.В. Эмпирическая модель компоновки шихты в ДСП для работы в энергосберегающем режиме. // Сталь. – 2014. № 5. С.31-35.
96. Паршин В.М. Сталеплавильное производство: резервы развития и повышения эффективности. // Сталь. 2015. № 2. С. 13-17.
97. Поволоцкий Д.Я., Кудрин В.А., Вишкарев А.Ф. Внепечная обработка стали. М.: МИСиС. 1995. 312 с.
98. Полозов Е.Г. Совершенствование технологии и улучшение технико-экономических показателей электроплавки на шихте из металлизированных окатышей с учетом особенностей механизма из плавления. Дис. канд. тех. наук. Москва. 1990. 111 с.
99. Производство горячебрикетированного железа (ГБЖ). Электронный ресурс http://wiki-ins.ru/wiki/Лебединский_ГОК/ Дата доступа 13.02.2018.

100. Протопопов Е.В., Темлянцев М.В., Максакова К.Е., Запольская Е.М. Исследование обезуглероживания углеродсодержащих ковшевых огнеупоров. // Сборник трудов 14 конгресса сталеплавателей. 2016. С. 388-393.
101. Работа ДСП со вспененными шлаками. Электронный ресурс <https://metallurgy.zp.ua/rabota-dsp-so-vspennymi-shlakami/> Дата доступа 05.09.2017.
102. Ровнушкин В.А., Аксельрод Л.М., Смирнов Л.А., Спирин С.А., Ярушина Т.В., Маряев И.Г., Вислогузова Э.А., Фефелов С.Ю. Механизм коррозии огнеупоров RH-вакууматора известковосиликатными шлаками различной основности. // Сборник трудов 13 конгресса сталеплавателей. 2014. С. 195-200.
103. Ровнушкин В.А., Спирин С.А., Смирнов Л.А. Технология производства из металлоотходов металлических гранул, пригодных в качестве металлошихты для ДСП. // Сборник трудов 13 конгресса сталеплавателей. 2014. С. 425-427.
104. Рудыка В.И. Перспективы технологии прямого восстановления железа в металлургическом производстве. // Черная металлургия. – 2017. № 11. С.14-22.
105. Румянцева Г.А., Немененок Б.М., Трибушевский В.Л., Горбель И.А. Магнезиальные флюсы и особенности их использования при плавке стали. Электронный ресурс https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/29841/Magnezialnye_flyusy_i_osobennosti_ih_ispolzovaniya_pri_plavke_stali.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Дата доступа 12.01.2018.
106. Рябчиков И.В., Белов Б.Ф., Мизин В.Г. О механизме взаимодействия оксидов металлов с углеродом. // Сталь. – 2014. № 5. С. 35-40.
107. Рябый Д.В., Кондрукевич А.А., Семирягин С.В. Механизм образования локального (дырочного) износа периклазоуглеродистой футеровки сталеразливочного ковша. // Новые огнеупоры. 2016. № 9. С. 3-6.
108. Савин А.В., Никольский В.Е. Сушка и подогрев металлолома в электросталеплавильном производстве: промышленная безопасность, экономика, экология. // Черная металлургия. – 2017. № 6. С.111-115.
109. Сазонов А.В., Кочергина И.Н. Анализ эффективности теплообмена при плавлении металлизированных окатышей в системе шлак-металл с целью совершенствования технологии выплавки электростали. // Черная металлургия. – 2018. № 3. С.52-56.
110. Сазонов А.В., Меркер Э.Э., Кочетов А.И. Особенности обезуглероживания металла при плавке окатышей в дуговой печи. // Известия Вузов. Черная металлургия. - 2008. - № 12. - С. 27-29.

111. Сборщиков Г.С. Введение в волновую теорию стабилизации газовой струи под уровнем расплава. // Известия ВУЗов. Черная металлургия, № 1, 2006, с. 55-58
112. Сборщиков Г.С. Володин А.М. К вопросу о движении ванны в печах с барботажным слоем. // Известия ВУЗов. Черная металлургия, № 7, 2009, с. 55-58.
113. Сборщиков, Г.С. Некоторые вопросы гидродинамики струйной продувки ванны. Автореферат дис. канд. техн. наук. М.: МИСиС, 1974. – 27 с.
114. Семин А.Е. Дефосфорация и глубокое обезуглероживание высоколегированных расплавов в условиях низкой окисленности. Дис. докт. тех. наук. Москва. 1996. – 347 с.
115. Семченко Г.Д., Борисенко О.Н., Бражник Д.А., Логвинков С.М., Повшук В.В., Шутеева И.Ю., Анголенко Л.А., Чопенко Н.С., Васюк О.А. Стойкие к окислению нанопропрочненные ПУ-огнеупоры на модифицированной фенолформальдегидной смоле. Часть 4. Термодинамическая оценка фазообразования в системах Mg-O-C-Al, Mg-O-C-Ni и MgO-Al₂O₃-NiO-SiO₂ при использовании комплексного антиоксиданта SiC+Al+Ni(NiO). // Новые огнеупоры. 2017. № 7. С. 23-33.
116. Семченко Г.Д., Повшук В.В., Старолат Е.Е., Борисенко О.Н. Свойства периклазоуглеродистых огнеупоров с разным количеством графита в шихте при использовании модификаторов жидкой ФФС и графита. // Новые огнеупоры. 2016. № 5. С. 44-48.
117. Семченко Г.Д., Шутеева И.Ю., Повшук В.В., Рожко И.Н., Борисенко О.Н., Анголенко Л.А., Старолат Е.Е., Шмыгарев Ю.М., Васюк О.А. Стойкие к окислению нанопропрочненные ПУ-огнеупоры на модифицированной фенолформальдегидной смоле. // Новые огнеупоры. 3 части. 2016. № 9, № 11. 2017. № 1. С. 25-32.
118. Смирнов А.Н., Семирягин С.В., Рябый Д.В. Промышленные исследования снижения стойкости рабочей футеровки сталеразливочного ковша. // Сборник научных трудов ДонГТУ. 2016. № 1 С. 54-58.
119. Смирнов А.Н., Шарандин К.Н., Сердюков А.А., Тонкушин А.Ф. Оценка условий образования гарнисажного слоя на рабочей поверхности футеровки конвертера. // Сталь. – 2014. № 8. С.52-56.
120. Сорокин Ю.В., Демин Б.Л., Щербаков Е.Н., Степанов А.И., Мурзин А.В., Жилин А.М. Получение из мелкодисперсных отходов брикетированных железоблюсов и их использование при производстве стали. // Сборник трудов 13 конгресса сталеплавателей. 2014. С. 447-450.

121. Спирин С.А., Бабенко А.А., Бурмасов С.П., Шарафутдинов Р.Я., Степанов А.И., Мурзин А.В., Ушаков М.В., Зубаков Л.В., Белев А.А. Анализ влияния отдельных технологических параметров процесса выплавки стали в ДСП на содержание азота и водорода в металле. // Сборник трудов 11 конгресса сталеплавильщиков. 2011. С. 206-209.
122. Способ выплавки стали в дуговой электропечи: Патент – 2542157 РФ. / Маслов Е.В., Зубов С.П., Востриков В.Г., Куликов В.В., Кузнецов М.С., Коровин Б.М. Публикация патента 20.02.2015.
123. Способ управления процессом плавки металлизированных окатышей в дуговой печи: Патент - 2082763 РФ. / Изгалиев Т.И., Вареников Ю.И., Лубашев Ю.А., Клачков А.А., Анисимов Н.К., Гаркуша В.М., Сидоров В.П., Потапов И.В., Овечкин В.В., Хренов Е.Б. Публикация патента 27.06.1997.
124. Стариков В.С., Темлянцев М.В., Стариков В.В. Огнеупоры и футеровки в ковшевой металлургии. М.: МИСиС, 2003. – 328 с.
125. Степаненко Д.А., Волкова О., Хеллер Х.-П., Оторвин П.И., Чебыкин Д.А. К обоснованию выбора рационального шлакового режима в металлургических процессах. // Сталь. 2017. № 9. С. 2-5.
126. Степанов В. А., Крахт Л.Н., Меркер Э.Э., Кем А.Ю., Харламов Д.А. Исследование эффективности электроплавки окатышей в дуговой печи при дожигании оксида углерода топливно-кислородными горелками. // Вестник ДСГТУ. 2016. № 2. С.97-104.
127. Степанов В.А., Меркер Э.Э., Крахт Л.Н. Повышение эффективности дожигания горючих газов в дуговой сталеплавильной печи. // Черная металлургия. – 2015. № 7. С.61-64.
128. Суворов С.А., Козлов В.В. Определение растворимости огнеупорных фаз в металлургических шлаках системы $\text{CaO-MgO-FeO(Fe}_2\text{O}_3\text{)-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$. // Новые огнеупоры. 2016. № 3. С. 74-75.
129. Суворов С.А., Козлов В.В. Фазовый состав и оптимизация химического состава шлаков. // Черная металлургия. – 2016. № 6. С.63-66.
130. Тимофеев Е.С. Совершенствование энерготехнологического режима выплавки стали в ДСП-150 при использовании горячебрикетированного железа в завалке с целью повышения эффективности производства. Дис. канд. тех. наук. Москва. 2007. 147 с.

131. Тимофеев Е.С., Кочетов А.И., Тимофеева А.С. Зависимость длительности расплавления шихты от ГБЖ в завалке при выплавке стали в ДСП-150. // Фундаментальные исследования. №11,2006. «Академия естествознания» С. 37-38.
132. Тимофеева А.С, Тимофеев Е.С. Исследование выплавки стали при использовании горячебрикетированного железа в завалке. // Metallurg. №3. 2007. с. 50.
133. Тимофеева А.С., Никитченко Т.В., Кожухов А.А. Исследование возможности повышения температуры брикетизируемого материала за счет снижения тепловых потерь при движении металлизированных окатышей от выхода из шахтной печи до брикет-прессов на установке металлизации НУЛ-III. // Черная металлургия. – 2013. № 4. С.34-37.
134. Тимофеева А.С., Никитченко Т.В., Моисеев И.В. Исследование вторичного окисления металлизированного продукта. // Сталь. – 2014. № 2. С.12-14.
135. Тимофеева Д.С., Кожухова В.И., Тимофеева А.С. Подготовка отходов процесса прямого восстановления железа для дальнейшего использования в металлургических переделах // Черная металлургия. – 2017. №1. С. 94-97.
136. Трахимович В.И., Шалимов А.Г. Использование железа прямого восстановления при выплавке стали. М.: Металлургия, 1982, 248 с.
137. Турчин М.Ю., Смирнов А.Н., Сысоев В.И. Комплексное использование магнезиального сырья, обеспечивающее современные требования к металлургическим агрегатам и качеству металла. // Сталь. 2017. № 3. С. 67-69.
138. Факторы, влияющие на стойкость футеровки. Электронный ресурс <http://metal-archive.ru/konverternye-processy/547-factory-vliyayuschie-na-stoykost-futеровki.html>
Дата доступа 05.09.2017.
139. Ханна А., Цеттль К.-М. Современный процесс выплавки стали в электродуговых печах и усовершенствование концепций их футеровки. // Новые огнеупоры. 2018. № 11. С. 5-14.
140. Хассан А.И. Исследование технологии плавки металлизированного сырья с различным содержанием фосфора в ДСП с целью повышения эффективности производства стали. Дис. канд. тех. наук. Москва. 2016. 134 с.
141. Хассан А.И., Котельников Г.И., Семин А.Е., Мегахед Г. Анализ технологии выплавки стали с использованием в шихте металлизированных окатышей и НВІ железа с повышенным содержанием фосфора // Черные металлы. 2015. № 5. С. 64–69.

142. Хассан. А.И., Котельников. Г.И., Семин. А.Е., Мегахед. Г. Анализ процесса дефосфорации при выплавке стали из металлизированного сырья с повышенным содержанием фосфора // Черные металлы. № 1. 2015. – С. 12-18.
143. Хёллинг М., Венг М., Геллерт С. Анализ производства губчатого железа с использованием водорода. // Черные металлы. – 2018. № 3. С.6-11.
144. Хорошавин Л. Б., Перепелицын В. А., Кононов В. А. – М.: Магнезиальные огнеупоры. Интермет Инжиниринг, 2001. – 576 с.
145. Цеттль К.М., Цоттлер П., Ламмер Г., Каммерхофер М. Реализация оптимальной стратегии ремонта дуговой сталеплавильной печи с применением современной системы Ankertwin, включающей функции торкрет-установки и машины для подсыпки откосов. // Новые огнеупоры. 2012. № 3. С. 95-98.
146. Черменев Е.А. Исследование процессов нагрева и плавления окатышей в ванне дуговой печи с целью повышения энергоэффективности электроплавки стали. Дис. канд. тех. наук. Москва. 2014. 183 с.
147. Черменев Е.А., Меркер Э.Э., Коберник О.П. Об эффективности электроплавки стали при загрузке металлизированного сырья через трубчатые электроды в ванну дуговой печи. // Черная металлургия. – 2013. № 5. С. 48-51.
148. Чижиков А.Г., Семин А.Е. Автоматизированный комплекс по приемке лома черных металлов. // Сборник трудов 14 конгресса сталеплавильщиков. 2016. С. 589-592.
149. Чичко А.А., Соболев В.Ф., Андрианов Н.В., Пивцаев В.В., Терлецкий С.В. Об алгоритмизации расчетов состава шлака дуговой сталеплавильной печи. // Литье и металлургия. – 2006. № 3(39). С. 130-136.
150. Шакуров А.Г., Журавлев В.В., Паршин В.М., Чертов А.Д., Ковалев В.Н., Запорожцева Н.А. Комплексная переработка жидких сталеплавильных шлаков с восстановлением железа и получением качественной товарной продукции. // Сборник трудов 13 конгресса сталеплавильщиков. 2014. С. 407-414.
151. Шалимов А.Г., Семин А.Е, Галкин М.П., Косырев К.Л. Инновационное развитие электросталеплавильного производства. М.: Металлургиздат, 2014. 308 с.
152. Шахпазов Е.Х., Зайцев А.И., Родионова И.Г. Ключевые направления развития металлургической технологии по обеспечению растущих требований к уровню, стабильности свойств и эксплуатационной надежности массовых высококачественных сталей. // Сборник трудов 11 конгресса сталеплавильщиков. 2011. С. 37-51.

153. Шешуков О.Ю., Вдовин К.Н., Шевченко О.И., Метелкин А.А., Феоктистов Н.А., Егиязарьян Д.К., Некрасов И.В. Рациональное наведение шлака при выплавке стали 110Г13Л. // Сталь. 2017. № 2. С. 20-22.
154. Шешуков О.Ю., Егиязарьян Д.К., Сивцов А.В., Цимбалист М.М., Некрасов И.В., Орлов П.П. Режим горения дуг переменного тока и структурные характеристики шлаков ковшевой металлургии. // Черная металлургия. – 2017. №1. С.54-59.
155. Шешуков О.Ю., Некрасов И.В., Бонарь С.Н., Егиязарьян Д.К., Цымбалист М.М., Сивцов А.В. Сульфидная емкость глиноземистых шлаков внепечной обработки стали и активность анионов кислорода. // Сборник трудов 14 конгресса сталеплавателей. 2016. С. 424-428.
156. Шешуков О.Ю., Некрасов И.В., Ушаков М.В. Влияние вариантов технологии на стойкость отдельных зон футеровки ДСП-135 ОАО “Северский трубный завод”. // Сборник трудов 11 конгресса сталеплавателей. 2011. С. 218-221.
157. Шлифаке Х., Рёпке Г., Пиотровски В. Использование губчатого железа в садке дуговой печи // Черные металлы. 1995. № 8–9. С. 23–26.
158. Шурыгин Ю.А. Организация режимов группы дуговых электропечей с позиции минимизации электропотребления. // Сталь. 2016. № 7. С. 23-27.
159. Эрбе А., Хеллер Х.-П. Потенциал расширения рынков сбыта товарного НВІ в Германии, Австрии и Швейцарии // Черные металлы. 2015. № 6. С. 24–30.
160. Юзов О.В., Петракова Т.М. Тенденции изменения показателей производства стальных труб на предприятиях России. // Сталь. 2016. № 9. С. 71-77.
161. Юзов О.В., Седых А.М. Тенденции развития мирового рынка стали. // Сталь. 2017. № 2. С. 60-67.
162. Юзов О.В., Седых А.М., Петракова Т.М. Тенденции изменения производственных и экономических показателей металлургических предприятий России. // Сталь. 2016. № 8. С. 75-80.
163. A new iron age beckons. // Metal Buletin Magazin. 2014. № 4. P. 50-51, 53.
164. Abel M., Hein M., Böhm C., Sterrer W., Vaillancourt D. Solutions for the Increased Usage of DRI in the Electric Arc Furnace. // AISTech 2014. Proceedings. 2014. C. 1007-1014.
165. Arzpeyma N., Widlund O., Ersson M. et al. Mathematical Modeling of Scrap Melting in EAF Using Electromagnetic Stirring. // ISIL International. 2013. 53. № 1. P. 48-55.
166. Brooks G., McClellan J., Maschamp D. et al. Optimizing chemical energy into EAF. // SEAIISI Quarterly Journal. 2012. № 4. P. 17-22.

167. Ellis D., Varick V., Abel M. et. al. EVRAZ Pueblo Best Practice Operation With SIMETAL EAF Ultimate Technology – 7 Years of Records in the Making. // AISTech 2013 Proceeding. 2013. C. 707-716.
168. Fontana A., O’Kane P., O’Connell D. Et al. Polymer Injection Technology as Foaming Slag Agent in the EAF: Operations in Australia and Thailand. // SEAIISI Quarterly Journal. 2012. № 2. P. 30-39.
169. Fuhai Liu, Rong Zhu, Kai Dong et al. Simulation and application of bottom-blowing in electrical arc furnace steelmaking process // ISIJ International. 2015. 55. № 11. C. 2365-2373.
170. Gonzalez O.J.P. et al. Effect of Arc Length on Fluid Flow and Mixing Phenomena in AC Electric Arc Furnaces // ISIJ International. – 2010. – Vol. 50. – No. 1. – P. 1-8.
171. Grobler F. R, Minnitt C. A. The increasing role of direct reduced iron in global steelmaking // South African Institute of Mining and Metallurgy journal.-1999. - № 3. - P.111-116.
172. Hornby S., Madias J., Torre F. DRI/HBI – exploding the myths. Электронный ресурс https://www.researchgate.net/publication/301641477_DRIHBI_-_exploding_the_myths Дата доступа 19.11.2017.
173. Hornby S., Madias J., Torre F. Myths and Realities of Charging DRI/HBI in Electric Arc Furnaces. // AISTech 2015, PR-368-204.5664
174. Hornby-Anderson S. The Educated Use of DRI/HBI Improves EAF Energy Efficiency and Yield and Downstream Operating Results.// European Electric Steelmaking Congress, Italy, May 2002.
175. Hsin-Chien Chuang, Jian-XunFu, Weng-SingHwang, Shin-HsienLiu. Effect of the composition of residual materials from steelwork on the crushing strength of DRI. // Steel Research International. 2012. 83. № 1. P. 5-10.
176. Jaleel Kareem Ahmad. Melting of a new carbon –free waxed sponge iron in Electric Arc Furnace (EAF) for steelmaking // International Journal of Materials Science and Applications. - 2015. - № 4. - P. 1-6.
177. Kazunobu Ogata, Yasuhiro Hoshiyama, Shigeyuki Takanaga. Effect of Al and Si on a mechanical characteristics of the carbon containing refractory // Taikabutsu Refractories. 2016. 68. №1. C. 24, 25.
178. Kirschen M., Hanna A., Zettl K.-M. Benefits of EAF Bottom gas purging systems. // AISTech 2013 Proceedings. 2013. C. 761-767.

179. Lanna P.G., Ehrhart D., Garzon M.V. et. al. BOF refractory linings: balancing brick life and gunning/ hot repairs to maximize performance. // AISTech 2014 Proceeding. 2014. C. 1301-1309.
180. Lee M., Trotter D., Mazzei O. The production of low phosphorus and nitrogen steels in an EAF using HBI // Scandinavian Journal of Metallurgy. - 2001. - V.30. - P. 286–291.
181. Manenti Angelo A., Economics and Value-in-Use of DRI in the USA // AISTech Proceedings. – 2015. – P. 333-344.
182. Martell F., Mendoza R., Melendez M. et al. // Increasing energy efficiency of the EAF at Tenaris Tamsa. //Iron and Steel Technology. 2013. № 1. P. 81-89.
183. Memoli F., Jones J.A.T., Picciolo F. How Changes in Scrap Mix Affect the Operation of Consteel EAF. // AISTech 2013 Proceedings. 2013. P. 795-808.
184. Mohamed Abd Elkader, Ayman Fathy, Mamdouh Eissa, Sayed Shama. Effect of Direct Reduced Iron Proportion in Metallic Charge on Technological Parameters of EAF Steelmaking Process. // ISIJ International. – 2016. – Vol. 5. – No. 2. – P. 2016-2024.
185. Opfermann A., Grosse A., Wohlfahrt S. Continuous Improvement of the EAF-Process – Operational at Badische. // SEAIISI Quarterly Journal.2013. № 2. P. 38-45.
186. Ottmar H., Oerter A., Schmeiduch G., Seigers U. – “Stahl und Eisen”, 1976, Bd 96, № 3, S.106-112.
187. Pagliosa C., Freire N., Cholodovskis G., Pandolfelli V.C.. MgO-C bricks containing nano-boron carbide. // Refractories World Forum. 2014. 6. № 2. P. 89-92.
188. Partyka A., Iriarte M.A., Gottardi R., Miani S. Optimization of the EAF Injection Systems. // AISTech 2014. Proceedings. 2014. C. 903-914.
189. Sanchez J. L. G., Conejo A. N., Ramirez-Argaez M. A. Effect of Foamy Slag Height on Hot Spots Formation inside the Electric Arc Furnace Based on a Radiation Model. // ISIJ International. – 2012. – Vol. 52. – No. 5. – P. 804-813.
190. Schult H. Benchmark Analysis – A Tool to Define the Next Development Steps? // SEAIISI Quarterly Journal. 2011. № 3. P. 30-36.
191. Shiotani T., Nishimura N. Methods of recycle with used MgO-C fire brick. // Taikabutsu Refractories. 2014. 66. № 7. C.312-316.
192. Stubbles John. Operating and environmental benefits from the production and use of hot briquetted iron // Iron & Steel Technology. - February 2007. – P. 34-42.
193. Tanaka Y., Fukuda N., Kogawa M. et al. Development of electric arc furnace enable to uniform melting. // CAMP-ISIJ. Zairyo to Purosesu. 2015. 28. № 1. C. 653.

194. Widlund O., Sand U., Hjortstam O, Zhang X. Modeling of Electric Arc Furnaces (EAF) With Electromagnetic Stirring. // STEELSIM, 4th International Conference on Modelling and Simulation of Metallurgical Processes in Steelmaking, Düsseldorf, 2011.
195. Yoshinori Matsuo, Masato Tanaka, Jyouki Yoshitomi et. al. // Taikabutsu Refractories. 2014. 66. № 4. P. 182-187.

**Приложение А – Схема точек измерений остаточной толщины футеровки ДСП.
Топография износа рабочего слоя футеровки.**

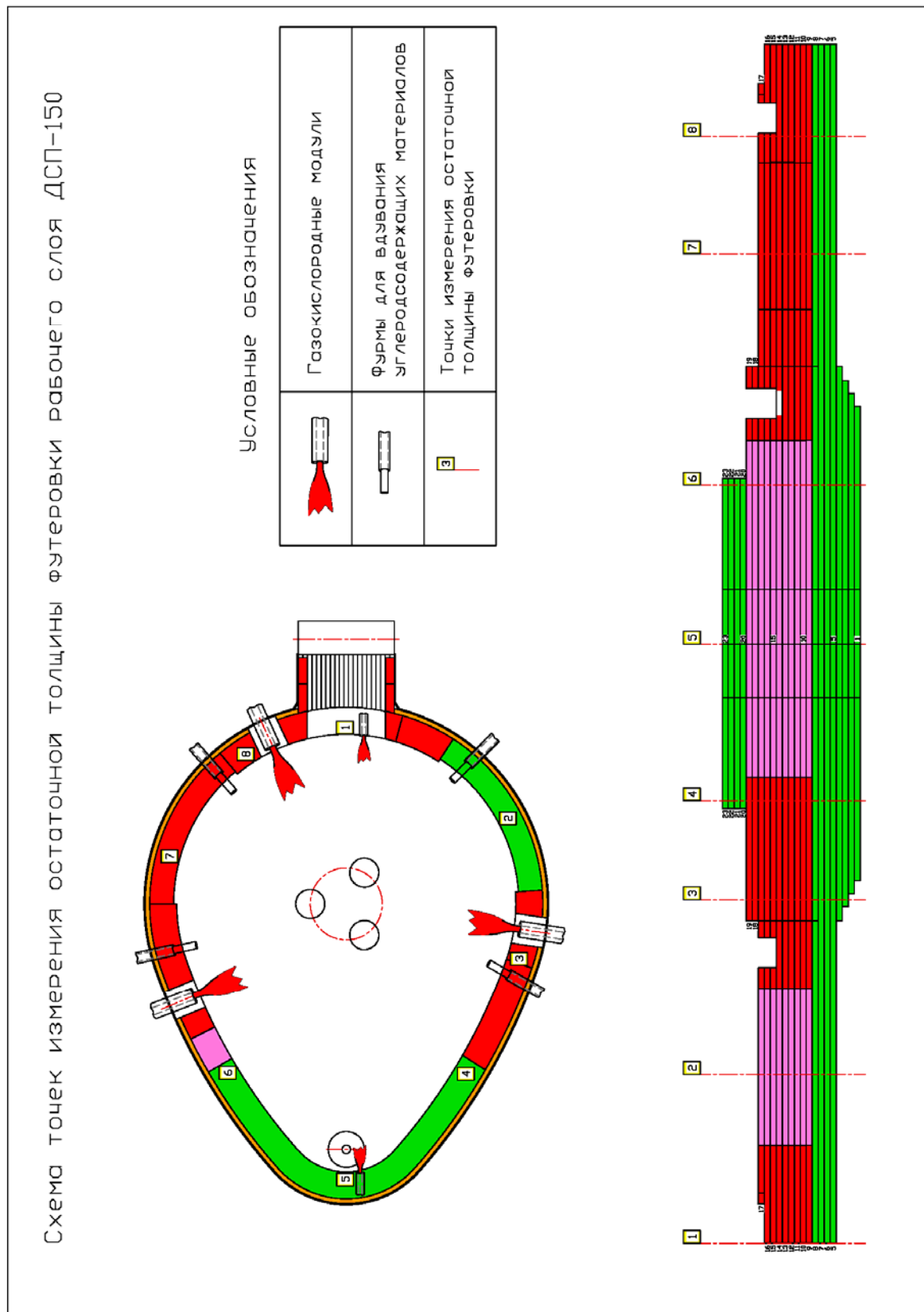


Рис. 6.1. Схема точек измерений остаточной толщины футеровки ДСП.

Таблица 6.1. Топография износа рабочего слоя футеровки ДСП-150 при демонтаже кладки, мм.

Номер ряда	Точки измерений остаточной толщины футеровки ДСП (остаточная/первоначальная)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
23				240 / 450	300 / 450	240 / 450		
22				240 / 450	300 / 450	240 / 450		
21				240 / 450	300 / 450	240 / 450		
20				160 / 450	270 / 450	160 / 450		
19			90 / 450	120 / 450	240 / 450	110 / 450		
18			80 / 450	70 / 450	270 / 450	80 / 450		
17		260 / 400	70 / 450	60 / 450	260 / 450	60 / 450	160 / 400	80 / 450
16	70 / 450	260 / 400	60 / 450	40 / 450	240 / 450	40 / 450	130 / 400	60 / 450
15	60 / 450	250 / 400	40 / 450	70 / 450	190 / 450	70 / 450	90 / 400	40 / 450
14	50 / 450	250 / 400	70 / 450	80 / 450	170 / 450	80 / 450	80 / 400	70 / 450
13	60 / 450	270 / 400	100 / 450	100 / 450	160 / 450	100 / 450	150 / 400	80 / 450
12	100 / 450	290 / 400	120 / 450	120 / 450	150 / 450	120 / 450	170 / 400	100 / 450
11	190 / 450	320 / 400	150 / 450	160 / 450	200 / 450	160 / 450	200 / 400	160 / 450
10	220 / 450	350 / 400	190 / 450	190 / 450	230 / 450	190 / 450	290 / 400	190 / 450
9	350 / 450	390 / 400	220 / 450	300 / 450	350 / 450	230 / 450	370 / 400	300 / 450
8	400 / 450	410 / 450	300 / 450	390 / 450	400 / 450	350 / 450	430 / 450	390 / 450
7	420 / 450	430 / 450	390 / 450	430 / 450	420 / 450	390 / 450	440 / 450	430 / 450
6	430 / 450	450 / 450	430 / 450	440 / 450	430 / 450	430 / 450	450 / 450	430 / 450
5	450 / 450	450 / 450	450 / 450	450 / 450	450 / 450	450 / 450	450 / 450	450 / 450
4			450 / 450	450 / 450	450 / 450	450 / 450		
3			450 / 450	450 / 450	450 / 450	450 / 450		
2				450 / 450	450 / 450	450 / 450		
1				450 / 450	450 / 450	450 / 450		

Приложение Б - Расчет затрат на производство полупродукта в ДСП-150 при использовании традиционно применяемой металлошихты и ГБЖ.

Сравнительный расчет затрат проводили на примере одной из технологической схемы производства полупродукта с использованием традиционно применяемой шихты. Расчет экономических затрат на 1 т полупродукта включает в себя затраты на применяемую металлошихту, электроэнергию, электроды, кислород, углеродсодержащие материалы, огнеупоры для изготовления футеровки ДСП (ПУ кирпич и набивная магнезиальная масса), шлакообразующие материалы (известь и MgO-содержащий флюс), огнеупоры для обслуживания футеровки печи (подварочная масса и торкрет-масса) и затраты на потери от выхода годного. Расчеты проводили при разных технологических режимах: при фактическом режиме обслуживания печи на примере законченных кампаний футеровки печи (таблица 6.2) и при режиме выплавки стали с учетом предложенных технических рекомендаций (таблица 6.3).

Таблица 6.2. Затраты на производство полупродукта при фактическом режиме обслуживания футеровки ДСП.

Доля ГБЖ в шихте, %	Длительность кампании и футеровки ДСП, пл	Доля шихты 1 - ГБЖ	Расход шихты 1, т/т	Затраты на шихту 1, \$/т	Доля шихты 2 - ЗАН-1 (ЗАН, ЗАЭ, ЗА)	Расход шихты 2, т/т	Затраты на шихту 2, \$/т	Доля шихты 3 - 15А (16А, 11А, 12А) - легковес	Расход шихты 3, т/т	Затраты на шихту 3, \$/т
0	1500	0	0	0	0,57	0,6629	147,17	0,13	0,1528	28,13
10	1125	0,10	0,1176	30,20	0,57	0,6629	147,17	0,13	0,1528	28,13
20	750	0,20	0,2352	60,40	0,57	0,6629	147,17	0,13	0,1528	28,13
30	375	0,30	0,3528	90,60	0,57	0,6629	147,17	0,13	0,1528	28,13
40	200	0,40	0,4704	120,80	0,47	0,5466	121,35	0,13	0,1528	28,13
50	150	0,50	0,588	150,99	0,37	0,4303	95,53	0,13	0,1528	28,13

Таблица 6.2. (продолжение). Затраты на производство полупродукта при фактическом режиме обслуживания футеровки ДСП.

Доля ГБЖ в шихте, %	Доля шихты 4 - ЗАЖД	Расход шихты 4, т/т	Затраты на шихту 4, \$/т	Доля шихты 5 - перчугун	Расход шихты 5, т/т	Затраты на шихту 5, \$/т	Расход электроэнергии кВт*ч/т	Затраты на электроэнергию \$/т	Расход электродов, кг/т	Затраты на электроды, \$/т
0	0,10	0,1053	29,02	0,20	0,2106	82,44	446,7	18,28	1,65	5,78
10	0,10	0,1053	29,02	0,10	0,1053	41,22	471,4	19,29	1,73	6,06
20	0,10	0,1053	29,02	0,00	0	0	496,2	20,31	1,81	6,34
30	0	0	0	0	0	0	521,0	21,32	1,89	6,62
40	0	0	0	0	0	0	545,8	22,33	1,97	6,90
50	0	0	0	0	0	0	570,5	23,35	2,05	7,18

Таблица 6.2. (продолжение). Затраты на производство полупродукта при фактическом режиме обслуживания футеровки ДСП.

Доля ГБЖ в шихте, %	Расход кислорода м ³ /т	Затраты на кислород \$/т	Расход антрацита, кг/т	Затраты на антрацит \$/т	Расход УСМ кг/т	Затраты на УСМ \$/т	Расход ПУ кирпича, кг/т	Затраты на ПУ кирпич, \$/т	Расход магнезальной массы, кг/т	Затраты на магнезальную массу, \$/т
0	39,9	11,16	11,5	1,11	7,7	0,99	0,25	0,37	0,20	0,14
10	40,9	11,44	12,7	1,22	10,7	1,38	0,33	0,49	0,26	0,18
20	41,9	11,72	13,9	1,34	13,7	1,77	0,49	0,74	0,40	0,28
30	42,9	12,00	15,1	1,46	16,7	2,16	0,99	1,48	0,79	0,55
40	43,9	12,28	16,3	1,57	19,7	2,54	1,85	2,78	1,48	1,04
50	44,9	12,56	17,5	1,69	22,7	2,93	2,47	3,70	1,98	1,38

Таблица 6.2. (продолжение). Затраты на производство полупродукта при фактическом режиме обслуживания футеровки ДСП.

Доля ГБЖ в шихте, %	Расход извести, кг/т	Затраты на известь, \$/т	Расход магнезального флюса, кг/т	Затраты на магнезальный флюс, \$/т	Расход подварочной массы, кг/т	Затраты на подварочную массу, \$/т	Расход торкрет-массы, кг/т	Затраты на торкрет-массу, \$/т	Выход годного, %	Затраты на потери от выхода годного, \$	Сумм. затраты, \$/т
0	44,0	3,06	9,50	1,09	1,44	0,65	1,0	0,53	88,3	0	329,9
10	55,7	3,87	10,49	1,21	1,58	0,71	1,1	0,58	87,4	2,84	325,0
20	64,4	4,48	11,48	1,32	1,73	0,78	1,2	0,63	86,4	5,62	320,0
30	73,1	5,08	12,47	1,43	1,87	0,84	1,3	0,69	85,5	8,34	327,8
40	81,8	5,69	13,46	1,55	2,02	0,91	1,4	0,74	85,4	8,63	337,2
50	90,5	6,29	14,45	1,66	2,16	0,97	1,5	0,79	85,3	8,91	346,0

Данные в таблице 6.2 рассчитывали следующим образом. Расчет длительности кампании футеровки печи производили с учетом анализа фактических стойкостей футеровки печи в зависимости от средней доли ГБЖ в шихте. При расчете расхода металлошихты учитывали ее расходный коэффициент на плавку. Расчет удельных расходов энергоресурсов производили с учетом анализа представленного массива плавок. При расчете расхода шлакообразующих добавок и огнеупорных материалов для ремонта ДСП использовали фактические данные, учитывающие расход добавок в зависимости от доли ГБЖ в шихте. Расход ПУ футеровки кирпича и магнезальной набивной массы производили с учетом стойкости и фактического расхода материалов на изготовление футеровки, которые составили соответственно около 50 т и 40 т при этом вес плавки принимали 135 т. Выход годного рассчитывали с учетом с учетом расходных коэффициентов шихты, установленных на ДСП на предприятии. Затраты за счет снижения выхода годного на 1% приняты на уровне 0,8% на 1 тонну полупродукта. Расчет затрат на

ресурсы производили в долларах США с учетом курса рубля в период эксплуатации ДСП при проведении анализа плавков.

Для сравнения, в таблице 6.3 представлен расчет затрат на производство полупродукта с учетом соблюдения технических рекомендаций, предложенных в настоящей работе.

Таблица 6.3. Затраты на производство полупродукта с учетом соблюдения технических рекомендаций, предложенных в настоящей работе.

Доля ГБЖ в шихте, %	Длительность кампании футеровки ДСП, пл	Доля шихты 1 - ГБЖ	Расход шихты 1, т/т	Затраты на шихту 1, \$/т	Доля шихты 2 - ЗАН-1 (ЗАН, ЗАЭ, ЗА)	Расход шихты 2, т/т	Затраты на шихту 2, \$/т	Доля шихты 3 - 15А (16А, 11А, 12А) - легковес	Расход шихты 3, т/т	Затраты на шихту 3, \$/т
0	1500	0	0	0	0,57	0,6629	147,17	0,13	0,1528	28,13
10	1300	0,10	0,1176	30,20	0,57	0,6629	147,17	0,13	0,1528	28,13
20	1100	0,20	0,2352	60,40	0,57	0,6629	147,17	0,13	0,1528	28,13
30	900	0,30	0,3528	90,60	0,57	0,6629	147,17	0,13	0,1528	28,13
40	700	0,40	0,4704	120,80	0,47	0,5466	121,35	0,13	0,1528	28,13
50	500	0,50	0,588	150,99	0,37	0,4303	95,53	0,13	0,1528	28,13

Таблица 6.3. (продолжение). Затраты на производство полупродукта с учетом соблюдения технических рекомендаций, предложенных в настоящей работе.

Доля ГБЖ в шихте, %	Доля шихты 4 - ЗАЖД	Расход шихты 4, т/т	Затраты на шихту 4, \$/т	Доля шихты 5 - перчугун	Расход шихты 5, т/т	Затраты на шихту 5, \$/т	Расход электроэнергии кВт*ч/т	Затраты на электроэнергию \$/т	Расход электродов, кг/т	Затраты на электроды, \$/т
0	0,10	0,1053	29,02	0,2	0,2106	82,44	446,7	18,28	1,65	5,775
10	0,10	0,1053	29,02	0,1	0,1053	41,22	463,6	18,97	1,71	5,985
20	0,10	0,1053	29,02	0	0	0	480,5	19,66	1,77	6,195
30	0	0	0	0	0	0	497,4	20,35	1,83	6,405
40	0	0	0	0	0	0	514,3	21,04	1,89	6,615
50	0	0	0	0	0	0	531,2	21,74	1,95	6,825

Таблица 6.3. (продолжение). Затраты на производство полупродукта с учетом соблюдения технических рекомендаций, предложенных в настоящей работе.

Доля ГБЖ в шихте, %	Расход кислорода мЗ/т	Затраты на кислород \$/т	Расход антрацита, кг/т	Затраты на антрацит \$/т	Расход УСМ кг/т	Затраты на УСМ \$/т	Расход ПУ кирпича, кг/т	Затраты на ПУ кирпич, \$/т	Расход магнезиальной массы, кг/т	Затраты на магнезиальную массу, \$/т
0	39,9	11,16	11,5	1,11	7,7	0,99	0,247	0,37	0,1975	0,14
10	40,5	11,33	12,9	1,24	11,7	1,51	0,285	0,43	0,2279	0,16
20	41,1	11,49	14,3	1,38	15,7	2,03	0,337	0,51	0,2694	0,19
30	41,7	11,66	15,7	1,51	19,7	2,54	0,412	0,62	0,3292	0,23
40	42,3	11,83	17,1	1,65	23,7	3,06	0,529	0,79	0,4233	0,30
50	42,9	12,00	18,5	1,78	27,7	3,57	0,741	1,11	0,5926	0,41

Таблица 6.3. (продолжение). Затраты на производство полупродукта с учетом соблюдения технических рекомендаций, предложенных в настоящей работе.

Доля ГБЖ в шихте, %	Расход извести, кг/т	Затраты на известь, \$/т	Расход магнезического флюса, кг/т	Затраты на магнезиальный флюс, \$/т	Расход подварочной массы, кг/т	Затраты на подварочную массу, \$/т	Расход торкрет-массы, кг/т	Затраты на торкрет-массу, \$/т	Выход годного, %	Затраты на потери от выхода годного, \$	Сумм. затраты, \$/т
0	47,0	3,27	10,58	1,22	1,44	0,65	1,0	0,53	88,3	0,00	330,2
10	51,8	3,61	11,68	1,34	1,58	0,71	1,1	0,58	87,4	2,84	324,4
20	56,7	3,94	12,77	1,47	1,73	0,78	1,2	0,63	86,4	5,62	318,6
30	61,5	4,28	13,86	1,59	1,87	0,84	1,3	0,69	85,5	8,34	324,9
40	66,4	4,62	14,95	1,72	2,02	0,91	1,4	0,74	85,4	8,63	332,1
50	71,2	4,96	16,04	1,84	2,16	0,97	1,5	0,79	85,3	8,91	339,5

Данные в таблице 6.3 рассчитывали следующим образом. Расчет длительности кампании футеровки печи производили с учетом прогноза стойкостей исходя из фактических стойкостей, достигнутых при поддержании заданного состава шлака, рекомендуемого в настоящей работе. При расчете расхода металлошихты при замене традиционно применяемой шихты на ГБЖ учитывали ее расходный коэффициент на плавку. Расчет расходов энергоресурсов производили с учетом анализа массива плавов в зависимости от количества образующегося шлака. При расчете расхода шлакообразующих добавок и огнеупорных материалов для ремонта ДСП использовали технические рекомендации, учитывающие расход добавок в зависимости от доли ГБЖ в шихте. Расход ПУ футеровки кирпича и магнезиальной набивной массы производили с учетом прогнозируемой стойкости и расхода материалов на изготовление футеровки, которые составляют 50 т и 40 т. При этом вес плавки принимали 135 т. Выход годного рассчитывали с учетом с учетом расходных коэффициентов шихты, установленных на ДСП на предприятии. Затраты за счет снижения выхода годного на 1% приняты на уровне

0,8% на 1 тонну полупродукта. Расчет затрат на ресурсы производили в долларах США с учетом курса рубля в период эксплуатации ДСП при проведении анализа плавков.

При расчете использовали следующие расходные коэффициенты металлошихты, полученные на основании опыта ее использования (таблица 6.4).

Таблица 6.4. Расходные коэффициенты металлошихты, принятые в расчете.

Тип металлошихты	Расходный коэффициент шихты, принятый для расчета
Передельный чугун	1,05
Горячебрикетированное железо	1,17
Мет. лом ЗАЖД	1,05
Мет. лом ЗАН-1 (либо ЗАН, ЗАЭ, ЗА)	1,16
Мет. лом 15А (либо 16А, 11А, 12А) - легковес	1,17

Стоимость металлошихты и вспомогательных материалов, принятая для расчетов представлена в таблице 6.5.

Таблица 6.5. Стоимость металлошихты и вспомогательных материалов, принятая для расчетов.

Вид металлошихты и вспомогательных материалов	Цена, \$/т
Горячебрикетированное железо	257
Передельный чугун	391
Мет. лом ЗАЖД	276
Мет. лом ЗАН-1 (либо ЗАН, ЗАЭ, ЗА)	222
Мет. лом 15А (либо 16А, 11А, 12А) - легковес	184
Электроэнергия (за кВт*ч)	0,041
Электроды	3500
Кислород (за м3)	0,280
Антрацит	96,4
УСМ	129,1
Известь	69,5
MgO-Флюс	115,3
ПУ кирпич для футеровки	1500
Магнезиальная набивная масса	700
Подварочная (заправочная) масса	450,3
Торкрет-масса	528,7

**Приложение В – Акты передачи материалов и опробования технических решений
при выплавке полупродукта в ДСП с использованием ГБЖ.**

		УТВЕРЖДАЮ Главный инженер АО «ВТЗ»  Трутнев Н.В. 1 "ноября" 2018 г.
Акт передачи материалов по технологическим решениям при выплавке полупродукта в электропечи с использованием горячебрикетированного железа.		
При выплавке полупродукта в ДСП-150 на АО «ВТЗ» применяют добавку горячебрикетированного железа (ГБЖ) в качестве металлошихты. Использование ГБЖ сопровождается изменением энерготехнологических показателей плавки, в том числе и стойкости футеровки ДСП. При отработке режимов плавки с применением ГБЖ было отмечено повышение расхода огнеупорных материалов для обслуживания футеровки печи. Материалы диссертационной работы Коростелева Алексея Александровича, посвященной анализу влияния ГБЖ на технологические показатели электроплавки, включающие стойкость футеровки ДСП, являются актуальными и результаты технологических решений, представленные в данной работе, планируется использовать при выплавке полупродукта в ДСП-150.		
Переданные материалы: Основные материалы, изложенные в диссертации на тему: "Исследование влияния ГБЖ в металлошихте на технологические показатели плавки и стойкость футеровки ДСП с целью повышения эффективности производства стали", включающие рекомендации по повышению стойкости футеровки ДСП.		
Главный металлург		И.В. Неклюдов
Начальник сталеплавильной лаборатории		В. В. Морозов
Начальник лаборатории теплотехники и огнеупоров		В.В. Казаков

УТВЕРЖДАЮ

Главный металлург ПАО «ТАГМЕТ»



Мещеряченко А.А.
 “23” ноября 2018 г.

АКТ

**опробования технологических решений при выплавке полупродукта
 в ДСП с применением горячебрикетированного железа.**

Начиная с 2015 года на ПАО «ТАГМЕТ» при выплавке стали в ДСП-150 в качестве добавки в металлошихту используют горячебрикетированное железо (ГБЖ). За время применения ГБЖ было зафиксировано изменение энерготехнологических показателей плавки, в том числе и стойкости рабочего слоя футеровки ДСП.

Анализ влияния ГБЖ на технологические показатели плавки, проведенный сотрудниками завода с участием Коростелева Алексея Александровича позволил выработать решения по оптимизации режима ведения плавки и поддержания заданной стойкости футеровки печи в условиях использования ГБЖ.

Материалы, изложенные в научных публикациях и диссертационной работе Коростелева А. А., посвященной исследованию влияния ГБЖ на технологические показатели электроплавки, включающие рекомендации по повышению стойкости футеровки печи, являются актуальными и результаты технологических решений, предложенные в данной работе, планируется использовать при выплавке стали в ДСП-150.

Начальник ЭСПЦ



И.С. Мурзин

Начальник сталеплавильной
 лаборатории



А.В. Стонога