

Отзыв
официального оппонента
на диссертационную работу Колмачихина Бориса Валерьевича
«Исследование процессов массообмена и оптимизация работы комплекса «печь с
погружной фурмой – внешний отстойник»»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

В современной цветной металлургии при переработке сульфидных руд наибольшее распространение получили автогенные процессы, при которых энергетические затраты компенсируются за счет реакций окисления сульфидов кислородной составляющей дутья.

Высокая производительность процесса обеспечивается интенсивным перемешиванием окисно-сульфидного расплава кислородно-воздушной смесью газов, подаваемой через погружную фурму. Возможность создания высокопроизводительных процессов получения, разделения шихты на шлаковую и штейновую составляющие требует комплектовать печи «Ausmelt» внешними отстойниками, одним или двумя, в зависимости от мощности печи. На ЗАО «Карабашмедь» медеплавильный агрегат – печь «Ausmelt» – укомплектована одним внешним отстойником. Ряд технологических проблем комплекса печь–отстойник требуют специального решения. В частности, необходимо уточнить физико-химические закономерности окислительных процессов в ванне печи, установить геометрию реакционной зоны в условиях продувки расплава через вертикальную фурму, оборудованную «завихрителями», установить связь между интенсивностью продувки расплава и процессом разделения образующихся при плавке окисдных и сульфидных фаз, шлака и штейна.

Автор диссертации разработал методологию математического описания процессов диффузии компонентов плавки в условиях существования подвижной межфазной границы. Методология основана на экспериментальных данных холодного моделирования процессов массопередачи через контактную поверхность «газовая фаза – гетерогенный расплав». Установлено, что ответственна за скорость окисления сульфидов железа диффузия серы из объема расплава к реакционной поверхности. Также определено влияние интенсивности дутья на дробление сульфидных капель меди в расплаве. В частности, установлено, что экстремальные дутьевые режимы приводят к переизмельчению сульфидных капель в расплаве, к снижению полноты разделения фаз и увеличению потерь меди со шлаком. Выведены интегральные уравнения для определения величины контактной поверхности в реакционной зоне.

Предложенные технологические инновации позволили установить оптимальный режим воздухокислородного дутья с критерием Архимеда (Ar) не более 50,2, рекомендовать введение серосодержащего материала непосредственно в реакционную зону, предложить полученные результаты к использованию при создании системы АСУТП.

Достоверность полученных научных результатов, выводов и рекомендаций обеспечивается использованием современных методик физико-химического эксперимента, широко применяемых прикладных программ обработки экспериментальных

данных, апробацией полученных результатов на международных конференциях, публикацией высокого уровня цитируемости, принятой в промышленности оценки эффективности предложенных технологических решений.

В первой главе диссертации проведен обширный и глубокий анализ основных показателей плавки в печах с погружной фурмой (TSL). В этом обзоре установлено, что попытки оптимизации состава шлаков не позволяют существенно повысить эффективность разделения фаз. В свою очередь оптимизация высоты слоя расплава и степени заглубления фурмы могут привести к положительным результатам.

В технической литературе отсутствует общий анализ гидродинамики барботируемой ванны и методика определения факторов, влияющих на полноту разделения шлаковых и штейновых фаз. Эти проблемы в литературе рассматриваются отдельно для каждого агрегата. Совершенно неизученной является важная стадия отстаивания расплавов.

В связи с вышеизложенным в диссертационной работе ставится ряд требующих решения задач:

1. Создание принципов расчета материального и теплового баланса с целью подготовки исходных данных для последующего моделирования процессов плавки.
2. Разработка модельного комплекса для изучения процессов перемешивания и отстаивания шлако-штейновых расплавов.
3. Разработка математической модели диффузионной кинетики окисления сульфидов железа и создание общей технологической модели плавки в печи Ausmelt ЗАО «Карабашмедь».
4. Формулировка рекомендаций по возможным путям совершенствования процесса отстаиванием.

Во второй главе рассмотрены физико-химические свойства и параметры процесса плавки. Для формирования базы данных моделирования возможных химических реакций между компонентами шихты в печах TSL собраны исходные материалы по работе ЗАО «Карабашмедь», а также предприятий Китая и Австралии. Расчеты осуществляли с использованием пакета прикладных программ HSC-4,0. В таблицах представлены величины изменения ΔG_T° реакций и константы равновесия. Представлены данные по химическим реакциям, определяющим окисление сульфида железа в расплаве. Считается, что сульфиды флотационных концентратов представлены пиритом, халькопиритом. При недостаточном количестве сульфидов в шихте в плавку может подаваться природный газ.

Основной реакцией, протекающей в подфурменной зоне, является эндотермическое восстановление сульфидом железа магнетита шлакового расплава. Подчеркивается, что кинетические закономерности процесса окисления сульфидов кислородом высших оксидов железа в автогенных барботажных технологиях необходимо изучать для понимания процессов снижения потерь меди со сливаемыми шлаками медеплавильного производства.

Материальный баланс плавки рассчитывался по основным подобранным реакциям процесса плавки. Объем флюсов рассчитывался по целевому содержанию SiO_2 ,

порядка 35%. Составы исходных материалов плавки, продуктов плавки после отстаивания, составы газовой фазы и результаты расчета теплового баланса представлены в таблицах и использованы при формировании исходных данных об объемах шлака и штейна для дальнейшего физического моделирования. Объем проведенной работы при таком анализе чрезвычайно велик. Предполагалось найти основные дутьевые параметры агрегата с погружной фурмой, влияющие на перемешивание и отстаивание взаимодействующих фаз с целью повышения скорости отстаивания расплава, содержащего мелкодисперсные взвешенные частицы сульфидов меди.

Геометрический параметр моделирования составил 1:50, а также 1:20 и 1:10. В качестве модельных жидкостей выбраны техническое жидкое масло и соленая вода. Соотношение плотности шлака и плотности штейна на модели

$$(\rho_{шл}/\rho_{шт}) - idem,$$

где $\rho_{шл}$ и $\rho_{шт}$ – плотность шлака и штейна. Плотность модельной воды с NaCl $\rho = 1197 \text{ кг/м}^3$, а плотность модельного масла – $\rho = 770 \text{ кг/м}^3$, что и соответствует соотношению $\rho_{шл}/\rho_{шт} = idem$.

Параметры дутьевого режима основывались на критериях подобия Re и Ar

$$Ar = (w^2 \rho) / (dg \rho_{ж}),$$

где ρ – плотность газа;
 d – диаметр отверстия фурмы;
 g – ускорение свободного падения;
 $\rho_{ж}$ – плотность жидкой фазы.

Критерий Re определялся по формуле

$$Re = \frac{vd\rho}{\mu},$$

где v – скорость потока газа;
 d – диаметр отверстия фурмы;
 ρ – плотность воздуха;
 μ – вязкость среды.

Расчетные данные сопоставлялись с практикой работы реального агрегата. Допускали расчетное отклонение критерия Рейнольдса до 15% при полном соответствии критерия Архимеда. Допускались следующие условия адекватности по критериям

Ar – idem;

Re – idem с отклонениями до 15%.

Принципиальная схема установки позволяла моделировать условия продувки и отстаивания в широких пределах без коренного демонтажа и переделки установки.

Результаты экспериментов по холодному моделированию фиксировали с помощью фото и видеоаппаратуры и приведены на 60 фото и видеоснимках. Стабильная фигура вращения реакционной зоны фиксируется при интенсивностях продувки до 8,14 м³/час. Увеличение дальнейшего объема дутья резко увеличивает брызгообразование.

Серии рисунков обрабатывались в графическом редакторе с нанесением на координатную сетку. Использовались снимки, сделанные с заглублением фурмы, соответствующем реальному плавильному агрегату.

На основании данных, полученных при холодном моделировании продувки печной ванны сформировалась модель процесса окисления сульфидов в условиях продувки расплава различными газовыми средами.

В модели приняты следующие допущения:

1. Рассматривается только один цикл, связанный с образованием расплава и физико-химическими процессами, протекающими в нем из отдельно загруженной массы расплава, и предусматривается аддитивная совокупность циклов.
2. Физико-химические процессы окисления сульфидов протекают на поверхности контакта фаз. Роль пузырьков газа заключается в перемешивании жидкой фазы и выравниванию концентраций по объему расплава.
3. Продолжительность существования поверхности контакта соответствует одному обороту (τ_1) и время образования нового элемента жидкости (τ_2) площадью S_T за одну фазу перемещения воронки по вертикали.
4. В любой момент времени на поверхности струи существует слой жидкой пленки шлако-штейнового расплава, с внутренней поверхности которой вязкое течение отсутствует, а с внешней – контактирует со свежими элементами расплава.
5. Окисление сульфидов газообразным кислородом происходит как растворенных, так и взвешенных капель в шлаке.
6. Скорость массоотдачи отдельных реагентов в расплаве и в газовой фазе описывается законом нестационарной диффузии.
7. Газ в струе нагревается мгновенно до температуры расплава.

Сложные расчеты и сравнение их результатов с результатами промышленных плавов показали, что окисление серы происходит в диффузионном, а не кинетическом режиме.

Результаты холодного моделирования процесса разделения фаз

Для изучения процесса оседания частиц штейна сквозь слой шлака использовалась смесь соленой воды и пищевого красителя, которую инжесктировали в слой масла. Процесс дробления частиц, объединения и оседания введенных в масло медицинским шприцем капель окрашенной соленой воды фиксировался на видео. Пробы растворов отбирались через определенное время с 4-х уровней. Результаты моделирования показали, что при продувке ванны с малым заглублением фурм даже экстремальный режим дутья не позволяет добиться необходимого перемешивания, что свидетельствует о низкой эффективности усвоения кислорода ванной, в то время как при большом заглублении эффективное перемешивание достигается и при малых значениях критерия Архимеда. С другой стороны, увеличение интенсивности продувки при заглублении, идентичном реальному, приводит к дроблению капель штейна, что негативно сказывается на эффективности разделения.

Оптимальными значениями Ag с точки зрения режима отстаивания остаются режимы до 50 включительно и размеры капель «штейна» ≥ 2 мм.

Основные научные положения диссертационной работы

Убедительно доказано результатами холодного моделирования и кинетическими расчетами, что оптимальным с точки зрения перемешивания ванны при отсутствии чрезмерного дробления частиц штейна является значение критерия Архимеда до 50,2 (51700 м³/г) для реального агрегата. Эта величина может использоваться для оптимизации режима дутья и подбора соотношений параметров: объем дутья, диаметр фурмы, степень обогащения дутья и заглубление фурмы.

На основании анализа литературных данных и результатов моделирования технологических процессов предложена математическая модель процесса плавки, сочетающая расчеты материального и теплового балансов с моделью массообмена.

В работе установлено, что диффузия кислорода не является лимитирующей для процесса окисления сульфидов. Скорость десульфуризации расплава контролируется массоотдачей серы в объеме расплава. Одним из вариантов интенсификации плавки может быть введение высушенного тонкоизмельченного концентрата непосредственно в реакционную зону через фурменное устройство.

В целом, представленная к защите диссертация является значительной по содержанию и объему, исключительно полезной научной работой. Диссертация выполнена на актуальную тему и посвящена разработке новых методов повышения производительности медеплавильных агрегатов, выяснению механизма окислительно-восстановительных процессов при автогенной плавке, созданию математической модели отдельных этапов плавки с целью создания АСУПП медеплавильного производства.

В работе следует сделать некоторые замечания:

1. Так на стр.25 диссертации есть такие предложения: «На первом этапе содержание меди в шлаке миксеров падает с 4; до 1%», «На втором этапе содержание падает с 1% до 0,5%...», «Химические потери меди со шлаком...». О какой меди идет речь: металлической, оксидной или сульфидной? В шлаке состав указывается – CaO –50%, SiO₂ – 30% и т.д.

2. Стр.31. Рис. 1.4.3.

Подрисуночный текст: «Схема жидкости в затопленной струе». Очень странный и очень непонятный подрисуночный текст, скорее запутывающий, чем поясняющий.

3. Стр. 47. Рис. 3.12.

Подрисуночный текст: «Принципиальная схема модели в масштабе 1:20». Позиция 1 на рис. не обозначена. Тоже и позиция 10.

4. Стр.48-50. Информация на рис.3.1.3 – 3.1.8 практически не читаема. Требуется ретуширование. Те же замечания по рис. 3.2.1. Что означает на этом рис. темное пятно?

5. Стр. 53. Рис.3.2.2. Что-либо прочесть не удалось даже в специальных очках.

6. Стр.73. Рис. 3.3.1.

Написано: «Доля штейна в % на различной высоте ванны в зависимости от времени при $A_g=10$ и заглаблении фурмы на модели 8 мм». Каким значком отмечено заглабление 8 мм.

То же самое для рис. 3.3.2, 3.3.3, 3.3.4, 3.3.5, 3.3.6, 3.3.7, 3.3.8.

7. Стр.79. Подпись под рис.3.4.1. «Зависимость давления от «высоты заглабления»». Либо просто «зависимость от заглабления», либо «от уровня заглабления». Высота заглабления? Как это понимать?

8. Рис.3.5.2 и 3.5.3, почти невозможно прочитать буквенные значения.

Сделанные замечания носят скорее редакционный характер и не влияют на содержательную часть работы.

Считаю, что диссертационная работа Колмачихина Б.В. выполнена на актуальную тему, содержит существенно новую научную и техническую информацию. Диссертация соответствует требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор, Колмачихин Борис Валерьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 – металлургия черных, цветных и редких металлов.

Официальный оппонент

Заслуженный деятель науки Российской Федерации,

профессор, доктор технических наук,

заведующий кафедрой материаловедения и физико-химии материалов

ФГАОУ ВО Южно-Уральский государственный университет (НИУ)

Михайлов Геннадий Георгиевич

454090, г. Челябинск, пр. Ленина, 76

Тел. 8-91

E-mail: mikhailovgg@susu.ru

Подпись Г.Г. Михайлова удостоверяю



18.05.2018