

Я.В. Мянновская, Ю.С. Пройдак, А.В. Бабенко, В.Ю. Камкин
**ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН КАПЕЛЬ
МЕТАЛЛА ПРИ ДВИЖЕНИИ В СЛОЕ ШЛАКА**

Аннотация. Проведенный анализ результатов материальных и тепловых балансов выплавки марганцевых ферросплавов показывает, что с отвальными шлаками теряется 5-8% ферросплавов в виде запутавшихся корольков. Интенсивность массообмена между каплями металла и шлаком связана с режимом движения капли и кинетическими характеристиками фаз, находящимися во взаимодействии. Доказано, что независимо от начальной температуры капель металла, за время их осаждения в шлаке они приобретают температуру шлака.

Ключевые слова: металл, шлак, теплообмен, гидродинамика.

Введение

Эффективность ферросплавных процессов производства марганцевых сплавов оценивается одним из главных показателей - достижение максимального полезного извлечения марганца в сплав, что достигается уменьшением его потерь с отвальным шлаком и улетом в газовую фазу.

В физико-химических процессах ферросплавного производства особенно важна роль шлаков и флюсов. В расплавленных шлаках значительная часть электрической мощности, подводимой в ванну печи в режиме сопротивления, превращается в теплоту. Формирование шлака определенного состава обеспечивает условия для достижения высокой термодинамической активности MnO. Создаются условия для более полного осаждения металлической фазы, которая формируется из восстановленных марганца и кремния. Однако в реальных ферросплавных процессах содержание оксидных соединений марганца в отвальных шлаках в пересчете на марганец может достигать 14-16% [1]. Анализ результатов материальных и тепловых балансов выплавки марганцевых ферросплавов показывает, что с от-

вальными шлаками теряется также до 5-8% ферросплавов в виде за­путавшихся корольков металла. Их количество в шлаке определяется плотностью металла и шлака, межфазным натяжением на границе их раздела, адгезией фаз, вязкостью шлака. Оптимальные величины этих физических свойств в значительной степени зависят от химиче­ского состава контактирующих фаз [2, 3].

Постановка проблемы

Жидкие металлургические шлаки представляют собой слож­ный объект для экспериментального и теоретического исследования. Высокие температуры, сложный химический состав, множество пря­мых и побочных реакций, как между компонентами шлака, так и при взаимодействии с окружающей средой, усложняют получение точных и достоверных данных о физико-химических свойствах и строении жидкого шлака [4 - 6]. Содержание в шлаке соединений различной природы и вероятностного характера химической связи между компонентами, склонности ряда оксидов к образованию неор­ганических полимерных структур [2] затрудняет описание физико-химические свойств шлаков. Это приводит к использованию для оценки реакционной способности шлака эмпирических корреляцион­ных соотношений. Изучение вязкости являлось и является предметом пристального внимания исследователей [7 - 13]. Результатом таких исследований явилось разработка моделей вязкости.

Анализ исследований и публикаций

Авторы [11] отмечают, что вязкость шлаков чрезвычайно чув­ствительна к размеру ионов, а также воздействию электростатиче­ских взаимодействий, и тем самым структуре шлаков. Систему шлак в металлургическом процессе часто составляют многочисленные ком­поненты. Оксиды в стальных шлаках обычно представлены Al_2O_3 , CaO , Cr_2O_3 , MgO , MnO , SiO_2FeO . Большинство из этих оксидов также являются важными компонентами в шлаках цветных металлов [12]. Оксиды SiO_2 , P_2O_5 и B_2O_3 обладают сильными, высококовалентными связями металл-кислород создают сетевые структуры, что приводит к высокой вязкости расплава. С добавлением щелочных и щелочнозе­мельных окислов, Li_2O , Na_2O , K_2O , MgO , CaO , а также другие оксиды

двухвалентных как MnO и FeO , сеть ломается и, следовательно, вязкость постепенно уменьшается. Величина эффекта сильно зависит от компонентов и их пропорции, присутствующих в шлаке. Амфотерные оксиды, такие как Al_2O_3 , Fe_2O_3 , могут действовать либо как оксиды образующие сеть, либо как разрушающие ее [8, 11].

Сложные взаимодействия между катионами и анионами делает прогнозирование и моделирование вязкости шлака проблематичным. Неопределенность в измерениях для многих шлаков составляет около $\pm 20\%$. Разбег приводимых значений вязкости для $<10\%$ [14]. Математические модели могут быть использованы для прогнозирования величин вязкости в зависимости от основных переменных и для выбора условий процесса и оптимизации производительности [15]. Классификация различных моделей и их характерных особенностей была представлена в работах [15,16]. Неоднозначность объяснения закономерностей изменения вязкости связана с существованием сложной зависимости электронной и кристаллографической структуры. В основном это связано с изменениями в размере и характере связывания кремнекислородных полиэдров в зависимости от химического состава расплава. Это приобретает важное значения для оценки показателей восстановления элементов из расплавов [6].

Постановка задач исследования

Процессы выплавки марганцевых ферросплавов связаны с процессами переноса: диффузия (массоперенос), вязкое течение оксидных расплавов и металла, электропроводность (перенос заряда). В связи с этим актуальной является задача определения гидродинамики и массообмена при взаимодействии твердых и жидких фаз при получении марганцевых ферросплавов. Для оценки показателей процесса получения ферромарганца выполнен расчет прогрева капель металла при его движении в отвальном шлаке химического состава, % мас.: $Mn-12,8$; $SiO_2-33,9$; $CaO-37,1$; $MgO-3,5$; $Al_2O_3-2,76$.

Гидродинамика и теплообмен между каплями металла в слое шлака

Углеродотермическое восстановление оксидов марганца из руды идет обычно в присутствии железа, в результате чего возникает жидкая металлическая фаза $Mn-Fe-C$, что существенно влияет на термодинамику и кинетику процесса. Однако, процесс восстановления манганозита может сопровождаться образованием легкоплавкой

эвтектики MnO-SiO_2 при контакте MnO с SiO_2 руды или кремнеземом шихты [17, 18]. В этом случае наряду с локальными объемами первичного металлического сплава также возникают объемы жидкого шлака, которые при своем стекании в ванну печи могут взаимодействовать с твердыми шихтовыми материалами. Наиболее вероятными местами возникновения локальных объемов металлической фазы являются места непосредственного контакта MnO с углеродом кокса, а также поверхность контакта шлаковой фазы с углеродистым восстановителем.

Возникновение объемов шлаковой фазы возможно за счет образования легкоплавкой эвтектики непосредственно из марганцевой руда как на поверхности самой руды, содержащей кремнезем, так и при образовании легкоплавкой эвтектики в местах контакта марганцевой руда и SiO_2 кремнезема. При своем движении вниз локальные объемы металла, а также и шлака, могут сливаться в более крупные объемы, которые растекаются в виде пленок по кускам твердых шихтовых материалов и при своем движении вниз взаимодействуют с ними. При этом возможно взаимодействие пленок металла и шлака как с кусками кокса, так и с кусками других шихтовых материалов.

Стекающие пленки шлака и металла в конце своего движения образуют капли металла и шлака, которые при своем отрыве от твердая кусковых шихтовых материалов попадают в слой шлака. Капли шлака ассимилируются жидким шлаком, увеличивая его массу, а капли металла при своем движении через слой шлака взаимодействуют с ним. Отрыв капель металла может происходить как на границе твердое-газ, так и на границе твердое-шлак. В ванне печи в результате этих процессов формируются объемы металла и шлака, на поверхности раздела которых также может происходить массообмен между ними.

Таким образом, в зоне плавления и восстановления руднофлюсовой шихты при стационарном состоянии процесса можно определить шесть открытых систем, взаимодействующих между собой. Ос-

новные способы массообмена реализуются при следующих взаимодействиях: взаимодействие капель металла, оседающих в слое шлака; взаимодействие капель металла с омывающим их газовым потоком; взаимодействие на плоской границе раздела шлак- металл в ванне печи: прямое восстановление пленок оксидного расплава, стекающих по кускам углеродистого восстановителя; науглероживание пленок металла при их стекании по кускам углеродистого восстановителя; косвенное восстановление пленок оксидного расплава в потоке газа.

Интенсивность массообмена между каплей металла и шлаком, в котором она осаждается, связана с режимом движения капли и кинетическими характеристиками взаимодействующих сред. Режим движения капли определяется величиной числа $Re = w \cdot d_k / \nu$, которое зависит от характерного размера капли (d_k), скорости ее движения (w) и вязкости шлака (ν), в котором она осаждается. В связи с этим возникает необходимость определения отрывного диаметра капель металла. Расчет отрывного диаметра капель производился по выражению

$$d_k = 1,75 \cdot \sqrt[3]{C(Q_k)} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_m - \rho_{ш})}}, \quad (1)$$

где $C(Q_k)$ – функция, зависящая от величины краевого угла смачивания; σ – поверхностное натяжение на границе металл-шлак; ρ_m и $\rho_{ш}$ – плотности металла и шлака. Неопределенность формы кусков твердых шихтовых материалов не позволяет однозначно рассчитать отрывной диаметр капель металла. В связи с этим определяли возможные минимальный и максимальный отрывной диаметр капель, образование которых может происходить на границе газ-твердое и на границе металл-шлак соответственно. В расчете приняты по данным [19] значения функции $C(Q_k)$ в пределах 0,5-0,9. Приняты следующие пределы значений поверхностного натяжения (температура 1500°С): для металла - 0,7-0,8 Н/м, для шлака 0,3 - 0,35 Н/м, кинематическая вязкость $2 \cdot 10^{-4}$ - $5,7 \cdot 10^{-4}$ м²/с. Плотность металла - 6000 кг/м³, плотность шлака 2700-2900 кг/м³. Для дальнейших расчетов отрывные диамет-

ры капель, рассчитанные по выражению (1), составляют: для металла 4,5-9 мм, для шлака 4,5-7 мм

Согласно [20], режим перемещения капель металла через шлак может быть определен по предельным значениям числа Архимеда. Для принятых значений отрывного диаметра капель и вязкости определено минимальное значение числа $Ar = 2,94$, что указывает на ламинарный режим движения капель, и максимальное значение числа $Ar=190,7$, что соответствует переходному режиму движения. Скорость осаждения капель металла при ламинарном режиме движения составляла 0,06 м/с, для переходного – 0,08 м/с. Число Re для найденных скоростей движения составляет 0,45 (для ламинарного движения $Re < 2$) и 3,5 (для переходного режима $2 < Re < 500$). Время осаждения капли металла через слой шлака толщиной около 200 мм составляет 2,5 - 4 с.

Частота образования капель металла рассчитывали из часовой производительности ферросплавной печи секундный съем металла на 1 м² площади пода составляет 0,023-0,025 кг/(м²·с), или $3,8 \cdot 10^{-6}$ - $4 \cdot 10^{-6}$ м³/(м²·с). При кратности шлака 0,9-1,1 объем шлака составляет $8 \cdot 10^{-6}$ - $8,5 \cdot 10^{-6}$ м³/(м²·с). Для капель металла радиусом 0,002-0,0045 м объемы капель $3,3 \cdot 10^{-8}$ - $4 \cdot 10^{-7}$ м³. При этом частота образования капель металла будет находиться в пределах 10-120 ед./(м²·с). Для капель шлака радиусом 0,002-0,0035 м объемы капель составляют $3,4 \cdot 10^{-8}$ - $1,8 \cdot 10^{-7}$ м³. Частота образования капель шлака 50-250 ед/м²·с).

При осаждении капель металла в слое шлака протекают процессы тепло- и массообмена между каплями и шлаком. В связи с тем, что размер капель невелик, конвективными потоками в их объеме можно пренебречь. При этом процессы нестационарного тепло- и массообмена могут быть описаны уравнениями молекулярной теплопроводности и молекулярной диффузии для шара. Поскольку капля металла перемещается в шлаке, приняты граничные условия 3 рода для процессов теплообмена. Физические свойства среда, в которой происходит передача теплоты или

вещества, характеризуются значением критерия Прандтля. Для процесса внешней теплоотдачи использовали критерий Нуссельта. Характер движения газа или жидкости определяется значением критерия Рейнольдса. Для дальнейших расчетов принято наиболее часто используемое в литературе уравнение (2), приведенное в [21]

$$Nu = 2 + 0,60 \cdot Re^{(1/2)} \cdot Pr^{(1/3)} \quad (2)$$

Для оценки результатов теплообменных процессов определяли безразмерные средние температуры, которые характеризовали степень завершенности процесса. Для капель металла диаметром 4,5-9мм, которые реально могут образоваться в процессе плавки и осаждающихся в шлаке, значение $Nu=9-10$, значение числа $Bi=8-12$, что соответствует смешанному лимитированию внешним и внутренним теплообменом. При среднем времени пребывания капли металла в шлаке 2-4 с, значение числа Fo для предельных диаметров капли составляет 4-20.

Вывод

Расчет завершенности процесса свидетельствует о полном завершении процесса теплообмена между каплями металла и шлаком. Таким образом, независимо от начальной температуры капель металла за время осаждения их в шлаке они приобретают температуру шлака. При этом капли металла осуществляют перемешивание шлака в ламинарном режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Металлургия марганца Украины / Б.Ф.Величко, В.А.Гаврилов, М.И.Гасик,, С.Г.Грищенко и др. Под общей и научной редакцией М.И.Гасика. – К.:Техника, 1996. – 472 с.
2. Есин О.А. О полимерной модели расплавленных силикатов и других оксидов //Сталь. 1979. - №7. С. 497-500.
3. Приходько Э.В. Моделирование структуры при исследовании связи между составом и свойствами оксидных расплавов// Изв. АН. Неорганические материалы. – 1980.-№5. – С.900-906.
4. Зайцев А.И., Могутнов Б.М., Шахпазов Е.Х. Физическая химия металлургических шлаков. М.: Интерконтакт Наука. 2008. 352 с.
5. Зайцев А.И., Могутнов Б.М. Жидкие шлаки как ассоциированные растворы. Фундаментальные исследования физикохимии металлических расплавов. - М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. - С. 228-246.
6. Гасик М.И., Зубанов В.Т., Поляков О.И. О применении фундаментальных соотношений к расчету свойств металлических и оксидных ферросплавных распла-

- вов//Интенсификация электроферросплавных процессов и повышение качества продукции. – Днепропетровск: Промінь, 1985. - С. 17-18.
7. Исследование вязкости и электропроводности шлаков силикомарганца с повышенным содержанием глинозема. Чубинидзе Т.А., Майсурадзе Г.Д., Бейдер Г.Д. – В кн.: Физикохимия и металлургия марганца. М.: Наука, 1983. С. 20-23.
 8. Исследование вязкости передельного шлака бесфлюсовой плавки углеродистого ферромарганца. Ракитина Н.И., Туркина Н.А., Морозов А.А., Дашевский В.Я., Карязина И.Н., Кашин В.И. В кн.: Физикохимия и металлургия марганца. М.: Наука, 1983. С. 16-20.
 9. Некоторые особенности шлакового режима электроплавки углеродистого ферромарганца Н.П.Лякишев, В.Я.Щедровицкий. В кн. Физико-химические исследования малоотходных процессов в электротермии. М.: Наука, 1985. С.31-36.
 10. М.И.Гасик, М.М.Гасик, А.Н.Овчарук. Термодинамика процессов восстановления при выплавке передельного силикомарганца. Современные проблемы металлургии. Научные труды. Выпуск 1. –С. 74-89.
 11. Э.В.Приходько, Д.Н.Тогобицкая. Роль информационных технологий в повышении качества металлопродукции. Современные проблемы металлургии. Том 3. // По материалам научно-практической конференции «Проблемы и перспективы получения конкурентоспособной продукции в горно-металлургическом комплексе Украины. – Днепропетровск: Системные технологии, 2001. – С.450-462.
 12. Тогобицкая Д.Н. Информационно-математическое моделирование шлаковых и железоуглеродистых расплавов// Металлургическая и горнорудная промышленность. 1998. - №4. С. 7-10.
 13. Математическое моделирование серопоглощительной способности шлаков при внепечной обработке стали. Надточий А.А., Сокур Ю.И., Камкина Л.В., Безшкурченко А.Г.//Системные технологии. – 5(94). - 2014. С.170-177.
 14. Seetharaman, S., Mukai, K. and DuSichen. Viscosities of slags - an overview . VII-International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts, The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004.
 15. Kondratiev, A., Jak, E. and Hayes, P.C. Predicting Slag Viscosities in Metallurgical Systems. Journal of Metals, November, 2002, pp. 41-45.
 16. Mills, K. The estimation of slag properties . Short course presented as part of Southern African Pyrometallurgy 2011, 7th of March, 2011.
 17. Опыт разработки математических моделей металлургических процессов с учетом неравновесности основных реакций / Л.В. Камкина, Я.В. Стомба, Ю.С. Пройдак // Системные технологии. - №2 (73). – 2011. - С. 22-31.
 18. Камкина Л.В., Ростовцев С.Т., Анкудинов Р.В. Исследование кинетики восстановления элементов в шихтах MnO-SiO₂-C//Известия АН СССР. - 1977. - №1.- С.22-27.
 19. Тепловые процессы при электрошлаковом переплаве//Под ред. Б.И.Медовара//К.: Наукова думка. – 1978. 304 с.
 20. Касаткин А.Г. Основные процессы и алгоритмы химической технологии//М.: Наука. – 1973. 752 с.
 21. Берд Р., Стьюарт В., Лайтфут Е. Явления переноса//М.: Химия. – 1974. 696 с.