

движение воздуха, погрешности обработки управляющих воздействий и измерений и т. д. Указанные обстоятельства приводят к рассмотрению задачи движения КА в условиях неопределенности.

В работе исследуется проблема использования непрерывных марковских процессов для получения статистических характеристик параметров движения спускаемого аппарата без проведения массовых расчетов возмущенных траекторий, что позволит существенно сократить машинное время для получения количественных оценок точности посадки КА. Предложен стохастический метод исследований траекторий движения КА.

Проведенный сравнительный анализ результатов, полученных с помощью предлагаемого метода и с применением известных методов численного интегрирования показал, что погрешности вычислений, полученных с использованием предлагаемого метода не превышают 5%.

Таким образом, показана принципиальная возможность использования предложенного метода для анализа возмущенных траекторий движения КА в атмосфере. Окончательное заключение об эффективности метода по сравнению с известными может быть сделано после его апробирования при решении задач с учетом определения статистических характеристик случайного процесса посредством обработки реальной измерительной информации.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЫ В СИСТЕМЕ ШЛАК-МЕТАЛЛ В ДУГОВОЙ ПЕЧИ

Федина В.В., Конарев А.В., Плеханов Р.В.

*Старооскольский технологический институт (ф) МИСиС,  
Старый Оскол*

Во время кипения сталеплавильной ванны наблюдается двухфазная область [1], состоящая из взвеси капелек металла различной величины в шлаке и капелек шлака в металле [2]. Эта переходная зона фаз шлак-металл определяет [3] не только эффект обезуглероживания ванны, её нагрев, но и влияет на производительность печи, так как уменьшение размера переходной зоны снижает потери металла со спускаемым шлаком и ведёт к снижению загрязнения металла капельками шлака [3, 4].

В связи с этим на 150-тонной дуговой печи в условиях ЭСПЦ ОАО «ОЭМК» были проведены исследования с целью определения величины этой двухфазной области на границе шлака и металла в течение окислительно-восстановительного периода электроплавки железорудных металлизированных окатышей (ЖМО).

Общую толщину шлакового покрова в ванне 150-т. ДСП определяли с помощью стальной штанги, загнутой на конце под углом 90° в десяти опытных плавках. Для определения состояния переходной зоны этим устройством отбирали одновременно три пробы шлака по его толщине. Затем на лабораторных весах взвешивали полученные пробы и определяли массу

чистого металла («корольков») в навеске шлака. При этом достаточно чётко можно было выделить три зоны: в верхнем слое процент металла в навеске составлял до 3,3%; в среднем слое от 3,3% до 4,6%; в нижнем слое до 7% при толщине шлака 480–550 мм, что соответствует массе металла в ванне 90–100 т. При массе металла 120–130 т толщина шлака менялась в пределах 300–350 мм. Масса металла в навеске составляла 1,3–3% для верхнего слоя; 3,3–4% для среднего; 4,6–6% для нижнего.

Аналогичная картина наблюдается и для относительного количества корольков в пробах шлака весом 150г, отобранных по ходу процесса на трех опытных плавках. Сравнительный анализ данных показывает, что в случае применения ТКГ в верхних слоях шлака содержание корольков несколько ниже и очевидно этот факт вызван более интенсивным перемешиванием шлака газовыми струями ТКГ в ванне.

Анализ структуры проб шлака, отобранных по толщине шлакового покрова ванны с помощью специального устройства, показал наличие трех зон: относительно чистый шлак с небольшим содержанием корольков металла диаметром 0.3–0.5 мм и этот слой размером 100–150 мм можно считать «псевдоспокойным»; переходный слой размером более 200 мм начинающийся с небольших частиц металла в шлаке диаметром около 0.6–0.8 мм и заканчивающийся конгломератами, состоящими из нескольких частиц, т.е. слипшимися корольками металла и крупными ошлакованными включениями металла до 3–5 мм; наконец, чистый металл с небольшим количеством мелких вкраплений шлака диаметром 0.1–0.5 мм.

Таким образом, двухфазная переходная зона шлак-металл представляет собой систему, состоящую из взвеси капелек (корольков) металла различной величины в шлаке и капелек шлака в жидком металле. Из полученных данных также следует, что величина переходного слоя шлак-металл и уровень насыщения шлака корольками определяется скоростью обезуглероживания ванны ( $V_c$ , % [C]/мин). Причем при малых значениях толщины шлака относительная масса корольков в нем существенно возрастает с увеличением  $V_c$ , т.е. при более высоких значениях кипения ванны в конце электроплавки ЖМО.

Анализируя приведенные опытные данные можно сделать вывод о том, что величина переходной зоны шлак-металл тем больше, чем больше мощность перемешивания ванны, т.к. последняя в значительной степени определяется [4] скоростью процесса окисления углерода в ванне ДСП. При расположении фронта обезуглероживания вблизи границы шлак-металл наблюдалось более интенсивное вспенивание шлака [5], за счёт образования большого количества мелких газовых пузырей СО вблизи границы раздела шлак-металл. Следовательно, наблюдаемое интенсивное вспенивание шлака в первые периоды электроплавки ЖМО в 150-т ДСП при температуре металла менее 1550 °С, а шлака около 1650 °С объясняется тем обстоятельством, что окатыши плавятся преимущественно в объеме переходной зоны шлака и металла при малых значениях  $V_c$  с образованием [5, 6] пены (скопление мелких пузырей СО и СО<sub>2</sub>) вблизи поверхности раздела фаз шлак-металл, т.е. полагаем, что пена

является следствием протекания реакции окисления углерода за счет кислорода в шлаке, а образующиеся пузырьки газа очень малы, обладают малой кинетической энергией и «застревают» в шлаке.

Установлено, что объём переходной зоны является функцией критерия перемешивания (обезуглероживания) ванны и уровня расположения фронта начала газовой выделения (размера пузырей газа) в жидкости. При этом, чем больше размер переходной зоны шлак-металл, тем выше уровень тепло- и массообмена в системе металл-шлак-дуга способствующий ускорению процессов плавления ЖМО и нагрева металлической ванны, а, следовательно, ускорению процесса электроплавки в целом.

Отсюда следует важный вывод о том, что в случае применения режима нагрева ванны при соответствующих длинах дуг и ступенях напряжения и обеспечение требуемого уровня вспенивания шлака (размера переходной зоны в системе шлак-металл) достигаются наилучшие условия по интенсификации процесса теплообмена от поверхности дуг к шлаку и массообмену в системе шлак – окатыши – металл.

Таким образом, для реальных условий электроплавки стали в ДСП ускорение процесса обезуглероживания металла приводит к повышению размеров переходной зоны шлак – металл и интенсификации процессов плавления ЖМО, т.е. к заметному возрастанию производительности агрегата.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевцов Е.К., Кочо В.С., Ерошенко В.А. и др. Механизм образования переходной зоны шлак-металл в мартеновской ванне. Известия ВУЗов «Черная металлургия» №1, 1974, с.42-50.
2. Кочо В.С., Ерошенко В.А. – «Вестник Киевского Политехнического института». Изд-во КГУ, 1967, №3, с. 50-57.
3. Боженко Ю.Е., Коршиков С.П., Потапов И.П. и др. // Сталь, №7, 2000. с. 26-28.
4. Григорян В.Н., Белянчиков Л.Н., Стомахин А.Я. Теоретические основы электросталеплавильных процессов. – М.: Металлургия, 1979 - 272с.
5. Охотский В.Б. Вспенивание сталеплавильных шлаков Известия ВУЗов «Черная металлургия» №6, 1998, с.2-10.
6. Тихомиров В.К. Пенны. Теория и практика их получения и разрушения. М: Химия, 1983.–263с.

#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ШЛАКОВОГО РЕЖИМА ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

Харламов Д.А., Черноусов С.Г., Серкин М.А.

*Старооскольский технологический институт (Ф) МИСиС,  
Старый Оскол*

С целью введения максимальной мощности в течение всего периода внепечной обработки в АКП и снижения расхода огнеупоров необходимо экранировать электрические дуги при помощи шлака [1,2]. Кроме того, для некоторых марок стали (ШХ15) необходимо уделять особое внимание процессу десульфурации, т.к. конечное содержание серы должно быть

$\leq 0,01\%$ . Поэтому на основе экспериментальных исследований в ЭСПЦ «ОЭМК» разработан алгоритм [3] для расчета оптимального шлакового режима внепечной обработки в АКОС.

Функционирование алгоритма осуществляется следующим образом: при установлении ковша в рабочее положение вводятся исходные данные, описывающие актуальные технологические параметры конкретной плавки, такие как масса металла и толщина шлака, химсостав шлака, температура металла, которые были измерены на установке вакуумирования или установке продувки аргоном, а также начальное и необходимое (конечное) содержание серы в металле.

После этого, по ходу нагрева металла в АКОС осуществляется непрерывный расчет текущей толщины шлака, с использованием зависимости

$$H_{\text{шл}} = -0,5 \cdot \Delta I^2 - 1,04 \cdot \Delta I + 23,17, (R=0,93) \quad (1)$$

где уровень флуктуаций фазовых токов ( $\Delta I$ ), находили по формуле стандартного отклонения разности между номинальным ( $I_n$ ) и  $n$  - измеренными значениями силы тока дуг ( $I_{di}$ ) по ходу нагрева металла:

$$\Delta I = \left[ \sum_{i=1}^n \left( \sum_{i=1}^n ((I_n - I_{di})/n) - (I_n - I_{di}) \right) / (n-1) \right]^{0,5}. \quad (2)$$

При этом происходит сравнение величины  $H_{\text{шл}}$  и длины электрических дуг, которые рассчитываются по формуле:

$$L_d = (U_d - U_{a-k}) / \beta \quad (3)$$

где  $\beta$  - градиент напряжения в дуге,  $\beta = 1000$  В/м,  $U_d$  - напряжение на дуге,  $U_d = \sqrt{U_{2\phi}^2 - (I_d X)^2} - I_d (R + R_{эд})$ , В,  $X$  - индуктивное сопротивление токопровода АКОС, Ом,  $R_{эд}$  - сопротивление электрода, Ом,  $U_{2\phi}$  - вторичное фазовое напряжение агрегата, В,  $\phi_{d-\phi}$ ,  $\phi_{d-св}$  - угловые коэффициенты излучения дуг на футеровку ковша и водоохлаждаемый свод.

Если  $L_d > H_{\text{шл}}$ , необходимо экранировать дуги при помощи шлака, путем добавки извести. Необходимая добавка извести рассчитывается по формуле

$$\Delta H_{\text{шл}} = 0,0035 \cdot G_{\text{изв}} \quad (4)$$

где  $G_{\text{изв}}$  - количество введенной извести, кг.

После этого заново проверяется условие экранирования. Если  $L_d > H_{\text{шл}}$ , проверяется условие достижения заданной конечной концентрации серы с металле. При этом учитывают необходимое значение  $[S]_{\text{кон}}$  для каждой марки.

Если текущая концентрация серы  $[S]_{\tau} > [S]_{\text{кон}}$ , то необходимо принять меры для ее удаления, путем обеспечения заданной величины основности и толщины шлака.

Для анализа эффективности применения предлагаемого алгоритма управления шлаковым режимом в АКОС проводили исследования удельного расхода электроэнергии в зависимости от толщины слоя шлака в ковше. Т.к. для одной и той же марки стали температурный режим обработки примерно одинаков, удельный расход электроэнергии ( $Q_{уд}$ , кВт·ч/т) будет зависеть от вводимого количества ферросплавов и шлакообразующих (т.к. они обладают охлаждающим эффектом), времени обработки на АКОС ( $\tau_{об}$ ), с уче-