УДК 669.046.5

Е.А. Черменев, Э.Э. Меркер, В.А. Степанов

Старооскольский технологический институт

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НАГРЕВА И ПЛАВЛЕНИЯ
ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ В ДУГОВОЙ ПЕЧИ**

Аннотация. По результатам экспериментальных данных, полученных при электроплавке железорудных металлизированных окатышей в дуговой печи, разработана математическая модель совместного нагрева и плавления окатышей в ванне агрегата. На основе результатов моделирования установлено, что осуществление режима плавления окатышей в подэлектродном пространстве дуговой печи позволяет существенно интенсифицировать процессы электроплавки стали с достижением более высоких энерготехнологических и технико-экономических показателей производства.

Ключевые слова: дуговая печь, нагрев и плавление окатышей, электрическая дуга.

E.A. Chermenev, E.E. Merker, V.A. Stepanov

Sary Oskol technological Institute

**DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL OF A HEATING
AND FUSION OF IRON-ORE PELLETS IN THE ARC FURNACE**

Abstract. According to the results of the experimental data gained at an electric smelting of DRI pellets in the arc furnace a mathematical model was developed of a joint heating and fusion of pellets in a unit bosh. On the basis of effects of modelling it is fixed that realization of a mode of fusion of pellets in under electrode space of the arc furnace allows to intensify essentially processes of electric steel smelting with the achievement of higher power technological and manufacture overall economics.

Keywords: arc furnace, heating and fusion of pellets, electric arc.

E-MAIL: fenix-evg@yandex.ru

По данным научных исследований [1, 2] перспективным направлением является электроплавка окатышей в дуговой печи с полыми (трубчатыми) электродами¹. Технологический режим электроплавки железорудных металлизированных окатышей (ЖМО) при такой системе их загрузки в ванну дуговой печи определяется условиями теплогенерации и теплообмена в электрической дуге, совместного протекания процессов нагрева и плавления окатышей в объеме шлако-металлического расплава, находящегося под воздействием высокотемпературной дуги [1].

Из анализа полученных экспериментальных данных [1, 2] по длительности плавления ЖМО в 150-т дуговой сталеплавильной печи (ДСП) следует, что при подаче ЖМО через каналы полых электродов в зону воздействия электрических дуг на поверхность расплава, время их нагрева и плавления уменьшается как за счет их дополнительного подогрева при прохождении через электрическую дугу, так и за счет более высокой температуры расплава в локальной зоне воздействия электрических дуг на поверхность ванны, что является более эффективным по сравнению с

другими технологическими вариантами электроплавки стали [2, 3].

Взаимодействие окатышей и стального лома с жидкой металлической ванной представляет собой сложный тепло- и массообменный процесс, являющийся в общем случае нестационарным [3].

В этой связи представляется необходимым более детальное рассмотрение процессов нагрева и плавления окатышей в ванне дуговой печи при различных способах загрузки окатышей в печь.

Исходя из особенностей протекания электроплавки ЖМО в дуговой печи [4], учета механизма взаимодействия твердого тела с железоуглеродистым расплавом [3], условий образования гарнисажной корочки на поверхности окатышей при их плавлении в ванне агрегата [5] и интенсификации плавления окатышей [2, 4] при их загрузке в зону воздействия электрической дуги на шлакометаллический расплав, предложена структура математической модели нагрева и плавления окатышей в системе дуга–шлак–металл.

Так, плавление окатыша в расплаве и в дуге представляет собой задачу теплопроводности с движущейся границей, составляющей особый класс задач внутреннего теплообмена. Численные методы решения этих, существенно нелинейных, задач достаточно подробно

¹ Меркер Э.Э., Карпенко Г.А., Черменев Е.А. Устройство и способ загрузки металлизированных окатышей в дуговую печь. Пат. 2487306 С1 и 2487172 С1 РФ; опубли. 10.07.2013, Бюл. № 19.

разработаны и наиболее часто для этого применяют различные модификации метода конечных разностей [3, 6].

При построении математической модели принимали ряд допущений и ограничений [1, 5]:

- металлизированный окатыш имеет сферическую форму и является однородным и изотропным;
- в сферической системе координат, связанной с центром окатыша, температурные поля являются осесимметричными;
- при плавлении окатыша в дуге плотность расплава равна плотности окатыша;
- при взаимодействии ЖМО с расплавом теплота не выделяется и не поглощается, жидкий расплав не проникает в поры, а теплофизические свойства окатыша характеризуются средними показателями, постоянными во всей расчетной области;
- теплота распространяется за счет теплопроводности, влияние вынужденной и свободной конвекции не учитываем;
- фазовые превращения происходят при определенных температурах;
- температура окружающего окатыш расплава постоянна.

При этом учитываем, что фазовые превращения, сопровождающие охлаждение и нагрев при плавлении окатыша, приводят к нелинейности задачи теплопроводности [6].

Плавление окатыша в шлаке

Рассмотрим постановку внутренней задачи теплообмена для случая подачи окатыша в ванну ДСП в межэлектродное пространство [4]. Исходя из того, что температура плавления шлака больше температуры плавления окатыша [7], процесс плавления окатыша можно разделить на несколько этапов.

1. Тепловой период, в течение которого на холодном окатыше возникает слой затвердевшего расплава и его толщина сначала растет, а затем, по мере прогрева окатыша, уменьшается вплоть до нуля.
2. Нагрев поверхности окатыша от температуры плавления шлака до температуры плавления окатыша.
3. Собственно плавление самого окатыша.

Постановка задачи

Для первого (теплового) периода.

Особенность математического описания нагрева тела в данном случае заключается в том, что искомое температурное поле удовлетворяет одномерному уравнению теплопроводности в сферических координатах

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad 0 < r < r_{\text{пов}}(\tau) \quad (1)$$

в области с движущейся границей $0 < r < r_{\text{пов}}(\tau)$, где $r_{\text{пов}}(\tau)$ – функция радиуса твердой поверхности окаты-

ша с учетом корочки, описывающая движение границы раздела, заранее неизвестна и сама подлежит определению в результате решения задачи; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C); c – удельная теплоемкость элементарного слоя, Дж/(кг·°C); ρ – плотность элементарного слоя, кг/м³.

В качестве начальных условий указываем исходное распределение температур по сечению окатыша и исходное значение его радиуса, так как в начальный момент времени тело является равномерно прогретым:

$$T(r, 0) = T_0, \quad 0 \leq r \leq r_{\text{ок}}, \quad r_{\text{пов}}(0) = r_{\text{ок}}, \quad (2)$$

где T_0 – начальная температура окатыша, °C; $r_{\text{ок}}$ – начальный радиус окатыша, м²;

Граничное условие при $r = 0$ является следствием симметрии температурного поля:

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial r} = 0. \quad (3)$$

Граничные условия на движущейся межфазной поверхности [при $r = r_{\text{пов}}(\tau)$] имеют специфический вид. Первое условие определяется тем, что фазовые превращения происходят при определенных температурах:

$$T(r_{\text{пов}}(\tau), 0) = T_{\text{пл}}, \quad (4)$$

где $T_{\text{пл}}$ – температура плавления намерзающего или плавящегося слоя, °C.

Второе условие выражает уравнение теплового баланса на границе раздела окатыш–расплав:

$$-\lambda \frac{\partial T(r_{\text{пов}}(\tau), \tau)}{\partial r} + q_o \pm \rho L v_{\text{пл}} = 0, \quad (5)$$

где $v_{\text{пл}}$ – объемная скорость кристаллизации (+) или плавления (–) слоя, м³/с; L – удельная теплота фазового превращения (плавления) расплава, Дж/кг; $q_o = a(T_{\text{расп}} - T_{\text{пов}})$ – тепловой поток конвективной теплоотдачи от расплава к поверхности окатыша; a – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·°C); $T_{\text{расп}}$ – температура расплава, °C; $T_{\text{пов}}$ – температура поверхности, °C.

Для второго периода (нагрева).

Искомое температурное поле в данном случае удовлетворяет уравнению (1), но в области $0 < r < r_{\text{ок}}$.

Начальными условиями являются распределение температур по сечению окатыша в конце первого периода.

Граничное условие при $r = 0$ аналогично предыдущему периоду (3).

Первое граничное условие на поверхности (при $r = r_{\text{ок}}$) аналогично условию (4), так как в конце периода она прогревается до температуры фазовых превращений.

Второе условие, с учетом того, что температура окружающего окатыш расплава постоянна, выражает уравнение теплового баланса на границе раздела окатыш–расплав и имеет вид:

$$\lambda \frac{\partial T(r_{\text{ок}}, \tau)}{\partial r} = \alpha (T_{\text{расп}} - T(r_{\text{ок}}, \tau)). \quad (6)$$

Для третьего периода (плавление).

Единственное отличие от первого периода в том, что начальное распределение температур по сечению окатыша берется в конце второго периода. В остальном математическое описание аналогично первому периоду и описывается той же системой.

Плавление окатыша в подэлектродном пространстве

Рассмотрим постановку внутренней задачи теплообмена для случая подачи окатыша в ванну ДСП через полый электрод [1, 7]. Исходя из того, что окатыш при подаче в ванну первоначально подвергается интенсивному излучению горячей электрической дуги, проходя подэлектродное пространство в непосредственной близости от нее, а температура плавления металла больше температуры плавления окатыша, процесс плавления окатыша можно разделить на несколько этапов.

1. Нагрев поверхности окатыша от начальной температуры до температуры плавления в результате воздействия излучения от дуги во время его падения.

2. Плавление окатыша в подэлектродном пространстве во время его падения в дуге. При этом расплав окатыша, накапливаясь на поверхности твердого остатка, передает тепло теплопроводностью от поверхности, подвергающейся излучению дуги, и сам нагревается выше температуры плавления окатыша.

3. Собственно плавление самого окатыша в жидком металле (с образованием корочки металла) подэлектродного пространства.

Постановка задачи

Для первого периода (нагрева).

Учитывая рассмотренные ранее выражения, математическое описание нагрева тела в данном случае также удовлетворяет уравнению (1) в области $0 < r < r_{\text{ок}}$ с начальными условиями (2), граничными условиями при $r = 0$ аналогично уравнению (3).

Первое граничное условие на поверхности (при $r = r_{\text{ок}}$) аналогично условию (4), так как в конце периода она прогревается до температуры фазовых превращений.

Второе условие выражает уравнение теплового баланса на поверхности окатыша и имеет вид:

$$\lambda \frac{\partial T(r_{\text{ок}}, \tau)}{\partial r} = q_{\text{изл}}, \quad (7)$$

где $q_{\text{изл}}$ – тепловой поток излучением от дуги на поверхность окатыша, Вт.

Для второго периода (плавление в дуге).

Поскольку в результате плавления образующийся расплав остается на поверхности и по принятому допущению имеет ту же плотность, то искомое температурное поле в данном случае удовлетворяет уравнению (1), но в области $0 < r < r_{\text{пов}}(\tau)$ для окатыша и $r_{\text{пов}}(\tau) < r < r_{\text{ок}}$ для расплава, т.е. имеем две границы: движущуюся между остатком окатыша и его расплавом и постоянную на поверхности расплава, воспринимающую излучение дуги.

Начальными условиями являются распределение температур по сечению окатыша в конце первого периода и $r_{\text{пов}}(0) = r_{\text{ок}}$.

Граничное условие при $r = 0$ аналогично предыдущему периоду (3).

Первое граничное условие на границе раздела окатыш–расплав определяется выражением (4).

Второе условие выражает уравнение теплового баланса на границе раздела окатыш–расплав:

$$\lambda \frac{\partial T(r_{\text{пов}}(\tau), \tau)}{\partial r} + \rho L v_{\text{пл}} = 0. \quad (8)$$

Граничное условие на поверхности (при $r = r_{\text{ок}}$) аналогично условию (7).

Для третьего периода (плавление в металле) математическое описание аналогично описанию третьего периода в математической модели плавления окатыша вне электрической дуги в ванне ДСП, изложенной выше.

Для решения таких задач используется сетка с переменным числом узлов. Принимали, что за один шаг по времени граница перемещается на один шаг по координате, т.е. при переходе к очередному моменту времени число шагов по координате n_k изменяется на единицу:

- при кристаллизации $n_{k+1} = n_k + 1$;
- при плавлении $n_{k+1} = n_k - 1$.

При таком подходе шаг по времени становится неизвестным и его также необходимо рассчитывать. Поэтому для решения таких задач использовали неявные разностные схемы, как безусловно устойчивые. Для моделирования плавления окатыша использовали неявную четырехточечную разностную схему как менее громоздкую в сравнении с шеститочечной [6].

При построении разностной схемы использовали метод баланса. Исходили непосредственно из законов сохранения энергии и переноса тепла, примененных к дискретному температурному полю.

Поскольку зависимость искомых значений температур от ее значений в предыдущий момент времени определяется разностными уравнениями неявным образом, то для расчета температурного поля необходимо их совместное решение. Получившиеся из разностных схем системы линейных алгебраических уравнений наиболее эффективно решаются методом прогонки [6].

Из системы неявных разностных уравнений сначала итерационным методом при прямой прогонке определяем заранее неизвестный шаг по времени и соответствующие ему прогоночные коэффициенты, а затем, зная из граничных условий температуру на поверхности, обратной прогонкой определяем искомое распределение температур и переходим к расчету аналогичным образом следующего шага по времени с новым числом шагов по координате. При расчете плавления в дуге перед определением шага по времени рассчитываем распределение температур в образующемся расплаве. Расчет завершается при уменьшении числа шагов по координате до нуля.

Адекватность модели проверяли путем сравнения результатов расчета с опытными данными [5] при погружении оловянных образцов в перегретый расплав олова. Разница не превышает 6 %, что свидетельствует об адекватности предложенной модели [1, 7].

Результаты расчета приведены на рис. 1 – 3. Из анализа данных рис. 1 следует, что время плавления ЖМО при подаче через трубчатые электроды на расплав под дугой в 4 – 5 раз меньше, чем при плавлении их в шлаке т.е. вне электродов и влияния электрической дуги [1]. При этом разница уменьшается с увеличением значения коэффициента теплоотдачи [2, 4]. При подаче окатыша в шлак на нем образуется корочка [5] толщиной до 25 % от радиуса окатыша, а сам тепловой период (существования корочки) достигает 35 % от времени плавления окатыша [7]. При подаче в расплав под электродом толщина корочки более чем в 3 раза меньше и при этом продолжительность теплового периода не превышает 20 %, а при высоких значениях коэффициента теплоотдачи (см. рис. 2) корочка не образуется и тепловой период отсутствует (окатыш плавится).

На рис. 2 приведены данные расчета по изменению текущего размера окатыша при его плавлении в зависимости от уровня теплоотдачи в шлаке (а) и в подэлектродной области печи (б), т.е. в области высокотемпературного расплава под воздействием на него электрической дуги [2].

Рис. 2. Изменение безразмерного радиуса окатыша во времени при подаче окатыша в шлак (а) и в подэлектродное пространство (б) при различных коэффициентах конвективной теплоотдачи, кВт/(м²·К): 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4; 5 – 5

Рис. 1. Изменение времени плавления окатыша (а), доли теплового периода (б) и относительной толщины намерзающей корочки (в) в зависимости от коэффициента теплоотдачи при разных способах подачи ЖМО в ванну ДСП: 1 – на расплав под дугой; 2 – в шлак

При этом температурные условия состояния окатыша можно проанализировать в динамике по ходу нагрева и плавления. Из данных результатов моделирования (см. рис. 3) следует, что при плавлении окатыша в объеме шлака к концу теплового периода (17,72 с) окатыш успевает прогреться, в то время как при подаче ЖМО в подэлектродное пространство по

Рис. 3. Распределение температур по сечению окатыша ($\alpha = 1 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$) при подаче окатыша в шлак (а) и в подэлектродное пространство (б) в различные моменты времени плавления, с:
 1 – 1,02; 2 – 1,98; 3 – 4,97; 4 – 10,09; 5 – 17,72; 6 – 20,11;
 7 – 29,93; 8 – 0,845; 9 – 2,37; 10 – 5,00; 11 – 7,50; 12 – 8,99

сечению окатыша присутствует существенный градиент температур.

Выводы. В работе предложена и разработана математическая модель нагрева и плавления железорудных окатышей в дуговой печи, адекватность которой была проверена сравнением с опытными данными экспериментов. С ее помощью проведена оценка процессов нагрева и плавления железорудных окатышей при различных способах их загрузки в ванну дуговой печи.

Результаты моделирования подтвердили эффективность подачи окатышей на расплав под дугой. Так, время плавления при этом в 4 – 5 раз меньше, чем при плавлении их в шлаке. В первом случае толщина корочки на окатыше в 3 раза меньше и при этом продолжительность теплового периода не превышает 20 %. При высоких значениях коэффициента теплоотдачи корочка не образуется и тепловой период отсутствует. В то время, как при подаче ЖМО в шлак образуется корочка толщиной до 25 % от радиуса окатыша, а сам тепловой период может достигать 35 % от времени плавления окатыша.

Температурные условия окатыша проанализированы в динамике по ходу нагрева и плавления. Установлено, что при плавлении окатыша в шлаке к концу тепло-

вого периода окатыш успевает прогреться, в то время как при подаче в подэлектродное пространство по его сечению присутствует градиент температур.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черменев Е.А., Меркер Э.Э., Харламов Д.А. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 5. С. 67 – 68.
2. Сазонов А.В., Меркер Э.Э., Черменев Е.А. // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2011. № 8. С. 62 – 64.
3. Нугуманов Р.Ф., Протопопов Е.В., Харлашин П.С., Бакст В.Я. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 8. С. 13 – 16.
4. Меркер Э.Э., Сазонов А.В., Гришин А.А. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2008. № 2. С. 31 – 33.
5. Гришин А.А., Меркер Э.Э., Кочетов А.И. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2006. № 1. С. 69 – 70.
6. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупеников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей: Учеб. для вуз. – М.: Металлургия, 1990. – 239 с.
7. Черменев Е.А., Меркер Э.Э. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 9. С. 8 – 10.

© 2014 г. Е.А. Черменев, Э.Э. Меркер, В.А. Степанов
 Поступила 14 октября 2013 г.