



There is developed and solved the mathematical model of dissolving process of burden in three-dimensional production, allowing for the peculiarities of modern technologies of steel melting in arc steel-making furnaces.

*С. С. БРОДСКИЙ, Ассоциация сталеплавателей Украины,
О. И. ПАВЛЮЧЕНКОВ, ООО «Техноинжиниринг», г. Днепрпетровск,
В. Ю. БОЛОТОВ, ДГТУ,
Э. В. ИВАНОВ, А. Д. ШЕВЧЕНКО, М. П. ГУЛЯЕВ, РУП «БМЗ»,
И. А. ПАВЛЮЧЕНКОВ, ДГТУ,
Н. Л. МАНДЕЛЬ, Д. Г. ГРИБОК, БНТУ*

УДК 669.187

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПЛАВЛЕНИЯ ШИХТЫ В СВЕРХМОЩНОЙ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

В мировом производстве стали наблюдается неуклонный рост доли электросталеплавильного производства, что вызвано в первую очередь улучшением основных показателей технологического процесса выплавки стали в дуговых сталеплавильных печах (ДСП). По результатам прогнозов, к 2010 г. мировое производство стали составит около 1 млрд т в год, а объем стали, выплаваемой в электропечах, возрастет примерно до 500 млн т, т. е. с 33% (по состоянию на 2001 г.) до 50% от общего мирового производства стали [1]. Основу успешного функционирования предприятий с электросталеплавильным производством составляет высокая экономическая эффективность работы технологических агрегатов, входящих в его состав, а также высокая степень совместимости их в едином технологическом цикле «ДСП – установка ковш – печь – МНЛЗ». Повышение производительности МНЛЗ при условии оптимального выбора параметров агрегата «ковш – печь» возможно только при обеспечении рациональной гибкой связи с плавильным агрегатом ДСП [2–5]. Поэтому оптимизация технологических и теплотехнических процессов в дуговых печах с учетом снижения энергопотребления и сокращение продолжительности плавки являются важной и актуальной задачей при проведении экспериментальных и теоретических исследований.

При модернизации действующих электродуговых печей и создании новых агрегатов основное внимание уделяется улучшению технико-экономических показателей производства за счет интенсификации процесса выплавки при минимальных затратах, что может быть достигнуто путем совершенствования режимов работы энерготехнологического оборудования.

В данной работе авторы поставили следующие задачи:

- разработать универсальную математическую модель процесса плавления металлошихты с учетом особенностей современных технологий выплавки стали в ДСП, геометрических параметров агрегатов, массы плавки, условий футеровки и охлаждения элементов печи, теплофизических свойств и состава шихтовых материалов, переменной тепловой мощности электрической дуги на разных стадиях ведения плавки, интенсификации протекания процессов конвективного тепло- и массопереноса при донной продувке металлической ванны инертным газом (в зависимости от расхода аргона, количества и расположения донных фурм), интенсификации подогрева металлошихты за счет применения газокислородных горелок (в зависимости от их количества и расположения), теплоты экзотермических реакций при окислении элементов шихты, конвективного нагрева шихты печными газами;
- для созданной математической модели разработать эффективный метод и составить программу расчета теплового состояния в рабочем пространстве ДСП;
- произвести промышленную апробацию созданной расчетной методики.

Отличительными чертами современных высокопроизводительных технологий выплавки стали в дуговых печах, хорошо зарекомендовавших себя на ведущих сталеплавильных заводах мира, являются:

- применение донной продувки жидкой металлической ванны инертными газами;
- регенерация энергии отходящих печных газов для подогрева металлического лома или подогрев лома в отдельном подогревателе;

- конвейерный способ подачи шихтовых материалов в печь;
- подача углеродсодержащих материалов для вспенивания шлака;
- использование в качестве металлошихты жидкого чугуна и металлизированных окатышей;
- применение газокислородных стеновых фурм и фурм манипуляторов;
- максимальное использование энергии химических реакций;
- донный выпуск плавки;
- водоохлаждение панелей печи и свода;
- ведение плавки на «болото»;
- совершенствование электрического оборудования, конструкций электродержателей и снижение потерь электроэнергии в подводящих магистралах.

На рис. 1 представлена дуговая сталеплавильная печь РУП «БМЗ», отвечающая современным требованиям.

Теоретическому исследованию процессов теплообмена в замкнутом пространстве ДСП посвящены работы, в результате которых были предложены различные схемы и методы расчета теплового состояния в рабочем пространстве ДСП [6–8]. Однако следует отметить, что в указанных работах авторами не в полной мере учитывалось комплексное влияние основных теплотехнологических факторов выплавки стали в ДСП.

Процесс плавления шихты в электродуговых сталеплавильных печах занимает значительную долю времени от продолжительности всей плавки (до 40 – 60%) и в технологическом плане постоянно совершенствуется, оказывая решающее значение на улучшение технико-экономических показателей выплавки стали. Сталеплавильный процесс как объект математического моделирования представляет собой сложную систему, в которой действуют процессы, подчиняющиеся законам термодинамики, тепло- и массопереноса, гидродинамики, кинетики и т.д. Теоретические и экспериментальные исследования этих процессов являются естественным базисом для построения их математического описания.

При построении математической модели расплавления металлошихты в дуговой сталеплавильной печи выделяются четыре стадии (стадия зажигания электрических дуг; стадия проплавления колодцев; стадия расплавления шихты закрытыми дугами в процессе вспенивания шлака; стадия доплавления шихты открытыми дугами), каждая из которых характеризуется особенностями протекания тепловых процессов [9, 10].

Разработанная в настоящей работе математическая модель учитывает возможность расчета печей, характеризующихся осевой несимметричностью, что вызывает необходимость рассматривать задачу в полной трехмерной пространственной постановке. Распределение температур в объеме шихты и «болота» описывается соответственно уравнениями теплопроводности для шихты, «болота» и шлаковой прослойки:

$$\begin{aligned}
 c_{ш} \rho_{ш} \frac{\partial T_{ш}(r, \varphi, z, \tau)}{\partial \tau} = & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{ш} r \frac{\partial T_{ш}(r, \varphi, z, \tau)}{\partial r} \right) + \\
 + & \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda_{ш} \frac{\partial T_{ш}(r, \varphi, z, \tau)}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{ш} \frac{\partial T_{ш}(r, \varphi, z, \tau)}{\partial z} \right) + \\
 & + Q_{ЭКЗ}(r, \varphi, z, \tau) + Q_{КОНВ}(r, \varphi, z, \tau),
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$Z_{шл} < z < Z_{ш},$$

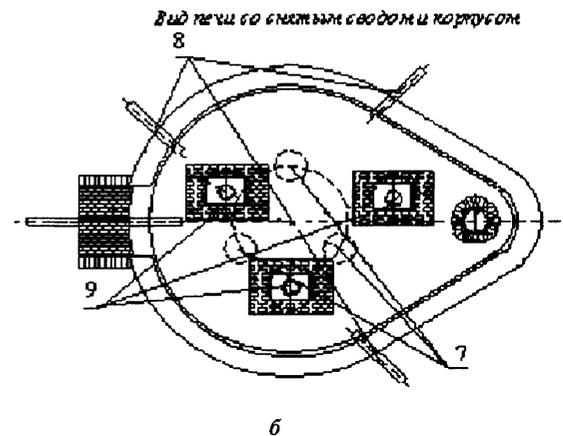
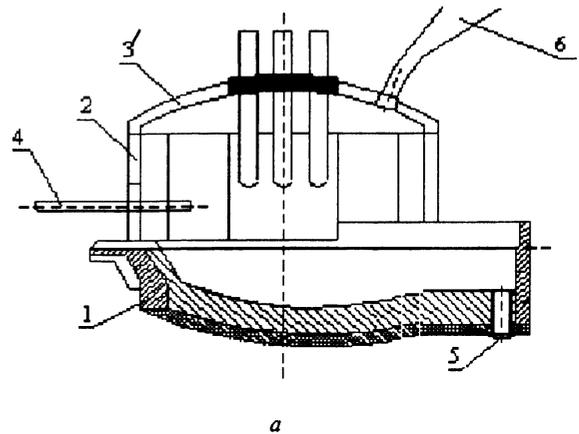


Рис 1. Схема расположения основного технологического оборудования ДСП: 1 – подина; 2 – корпус; 3 – свод; 4 – фурма-манипулятор; 5 – устройство донного экцентричного выпуска металла; 6 – система подачи окатышей и присадочных материалов; 7 – система электродов; 8 – стеновые топливно-кислородные горелки; 9 – подовые фурмы

$$c_{\text{шл}} \rho_{\text{шл}} \frac{\partial T_{\text{шл}}(r, \varphi, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\lambda_{\text{шл}} r \frac{\partial T_{\text{шл}}(r, \varphi, z, \tau)}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} (\lambda_{\text{шл}} \frac{\partial T_{\text{шл}}(r, \varphi, z, \tau)}{\partial \varphi}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda_{\text{шл}} \frac{\partial T_{\text{шл}}(r, \varphi, z, \tau)}{\partial z}), \quad Z_6 < z < Z_{\text{шл}} \quad (2)$$

$$c_6 \rho_6 \frac{\partial T_6(r, \varphi, z, \tau)}{\partial \tau} + v_r \frac{\partial T_6}{\partial r} + v_\varphi \frac{\partial T_6}{r \partial \varphi} + v_z \frac{\partial T_6}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\lambda_6 r \frac{\partial T_6(r, \varphi, z, \tau)}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} (\lambda_6 \frac{\partial T_6(r, \varphi, z, \tau)}{\partial \varphi}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda_6 \frac{\partial T_6(r, \varphi, z, \tau)}{\partial z}), \quad 0 < z < Z_6 \quad (3)$$

где $T_{\text{шл}}(r, \varphi, z, \tau)$, $\lambda_{\text{шл}} = \lambda_{\text{шл}}(T_{\text{шл}}, r, \varphi, z)$, $\rho_{\text{шл}} = \rho_{\text{шл}}(T_{\text{шл}}, r, \varphi, z)$ – соответственно температура, °С; теплопроводность, Вт/(м·°С); плотность шлака, кг/м³; $Q_{\text{эк}}(r, \varphi, z, \tau)$ – теплота экзотермических реакций, Вт/м³; $Q_{\text{конв}}(r, \varphi, z, \tau)$ – теплота, подводимая к шихте конвекцией с отходящими печными газами, Вт/м³; v_r, v_φ, v_z – компоненты вектора скорости жидкой металлической ванны.

На поверхности контакта шихты или «болота» с футеровкой стен печи или пода заданы граничные условия III рода с постоянными коэффициентами теплоотдачи [10]. На оси симметрии печи задано условие симметрии, на границах «болото» – шлак, шлак – шихта – граничные условия IV рода, на верхней границе шлаковой прослойки в зоне дуги – условие лучистого теплообмена. Прогрев расплава за счет выделяющейся теплоты экзотермических реакций учитывается введением в уравнение (1) источникового члена $Q_{\text{эк}}$, который локализован в зоне подачи кислорода и рассчитывается как суммарный тепловой эффект от окисления известной массы вещества. Дополнительный подогрев шихты печными газами учитывается в математической модели источниковым членом в уравнении (1), который рассчитывается следующим образом:

$$Q_{\text{эк}} = \alpha_v (T_v(r, \varphi, z, \tau) - T(r, \varphi, z, \tau)). \quad (4)$$

Вопрос определения числовых значений коэффициента α_v рассматривался подробно в [6]. Процесс движения границ расплавляемой шихты описывается согласно методу с явным выделением границы плавления Никитенко [11].

Математическая модель гидродинамики жидкой металлической ванны в полости ДСП при донной продувке диспергированным аргоном в предположении о сплошности единой газожидкостной среды имеет вид

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial \tau} = R(\vec{V}, \alpha') - \nabla P', \quad (5)$$

$$\nabla \vec{V} = \Phi(\vec{V}, \alpha'), \quad (6)$$

$$\frac{\partial \alpha'}{\partial \tau} = -\nabla(\alpha' \vec{V}) + \Phi(\vec{V}, \alpha'), \quad (7)$$

$$R(\vec{V}, \alpha') = -(\vec{V} \nabla) \vec{V} + v_v(T) \Delta \vec{V} - \alpha' \vec{g}, \quad (8)$$

$$\Phi(\vec{V}, \alpha') = \Psi - \alpha' \xi \rho_v(T) \vec{g} (\vec{V} + \vec{W}) - \nabla(\alpha' \vec{W}), \quad (9)$$

где \vec{V} – барицентрическая скорость среды; t – время; P' – динамическая составляющая давления, отнесенная к плотности расплава; α' – коэффициент объемного газосодержания; v_v – эффективный коэффициент вязкости; \vec{g} – ускорение свободного падения; Ψ и \vec{W} – соответственно объемный источник и диффузионная скорость газовой фазы; $\xi = \frac{1}{\gamma \rho_v}$ (γ – показатель политропы аргона).

Граничными условиями для скоростей являются на стенках печи условия непротекания и свободного скольжения, на границе жидкой ванны и шихты – условие трения.

Идентификация результатов расчетов в соответствии с разработанной математической моделью проводилась путем сопоставления с производственными данными балансовых плавов с расширенным контролем энергетических и технологических параметров для 100-тонной ДСП РУП «БМЗ». В качестве металлошихты используются лом, брикетированные металлические отходы, отходы твердого чугуна, металлизированные окатыши. Адекватность математической модели проверялась сопоставлением расчетных и производственных данных по общей длительности расплавления металлошихты и температуре выпуска стали. В результате идентификации была получена математическая модель с удовлетворительной сходимостью расчетных и производственных данных – 0,5– 1,5%.

Разработанная математическая модель позволяет значительно сократить объем трудоемких и дорогостоящих экспериментальных исследований и расчетным путем определить эффективные тепло-технологические параметры работы электродуговых сталеплавильных агрегатов.

Литература

1. Шалимов А. Г. // Сталь. 2001. №6. С. 60–63.
2. Еланский Д. Г. // Электromеталлургия. 2001. № 5. С. 3–15.
3. Лопухов Г. А. // Электromеталлургия. 2001. № 1. С. 7–31.
4. Фукс Г., Геллер К., Пельц Б. // Сталь. 2000. № 3. С. 30–34.
5. Минаев А. А., Смирнов А. А., Пилушенко В. Л. и др. // Металл и литье Украины. 2001. № 5–6. С. 7–10.
6. Игнатов И. И. // Математическое моделирование и расчет дуговых и плазменных печей: Сб. ВНИИЭТО. М.: Энергоиздат, 1983.
7. Попов Н. Н., Игнатов И. И. // Изв. вузов. Черная металлургия. 1986. С. 42–46.
8. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Стеблов А. Б., Павлюченков И. А. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах. Мн.: Выш. шк., 1992.
9. Кривандин В. А., Егоров А. В. Тепловая работа и конструкции печей черной металлургии: Учебн. для вузов. М.: Металлургия, 1989.
10. Егоров А. В. Расчет мощности и параметров электроплавильных печей: Учеб. пособие для вузов. М.: МИСИС, 2000.
11. Никитенко Н. И. Сопряженные и обратные задачи тепломассопереноса. Киев: Наукова думка, 1988.