

УДК 681.5:51-74

Разживин А. В., Храмов С. О.

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ДУГОВОЙ ПЛАВКЕ МЕТАЛЛА

Наиболее важным элементом в электрическом контуре дуговой сталеплавильной печи (ДСП) является электрическая дуга, определяющая работу печи и характер процессов в электрическом контуре. Следовательно, актуально автоматическое регулирование параметров электрической дуги. Основным параметром электрической дуги является ее мощность, которая непосредственно влияет на скорость нагрева жидкого металла [1]. Обычно регулирование мощности осуществляется путем переключения ступеней напряжения на печном трансформаторе.

Целью работы является определение аналитических соотношений распределения мощности на электрической дуге в пространстве ковша.

Рассматривая технологический процесс электротермической обработки металла в восстановительный период плавки и конструктивные особенности дуговых сталеплавильных печей и технологических комплексов «Печь-Ковш», представим дуговую печь тремя взаимодействующими между собой подсистемами:

3) печной трансформатор с механизмом переключения ступеней напряжения, обеспечивающий электрическую мощность на низкой стороне трансформатора P_{cm} ;

4) электрическая дуга, непосредственно преобразующая электрическую энергию в подводимую к металлу теплоту и характеризующаяся выделяемой электрической мощностью $P_{дуги}$;

5) печь, в которой происходят процессы преобразования жидкого металла в сталь заданного качества и характеризующаяся мощностью тепловых потерь P_{mn} .

На рис. 1 изображены основные электрические и тепловые процессы, влияющие на температуру жидкого металла.

Структуру модели электротермической печи представим в виде двух частей:

- электрическая часть, в которую входит печной трансформатор, короткая сеть и электрическая дуга;
- тепловая часть, куда входит собственно печь с жидким металлом и шлаком.

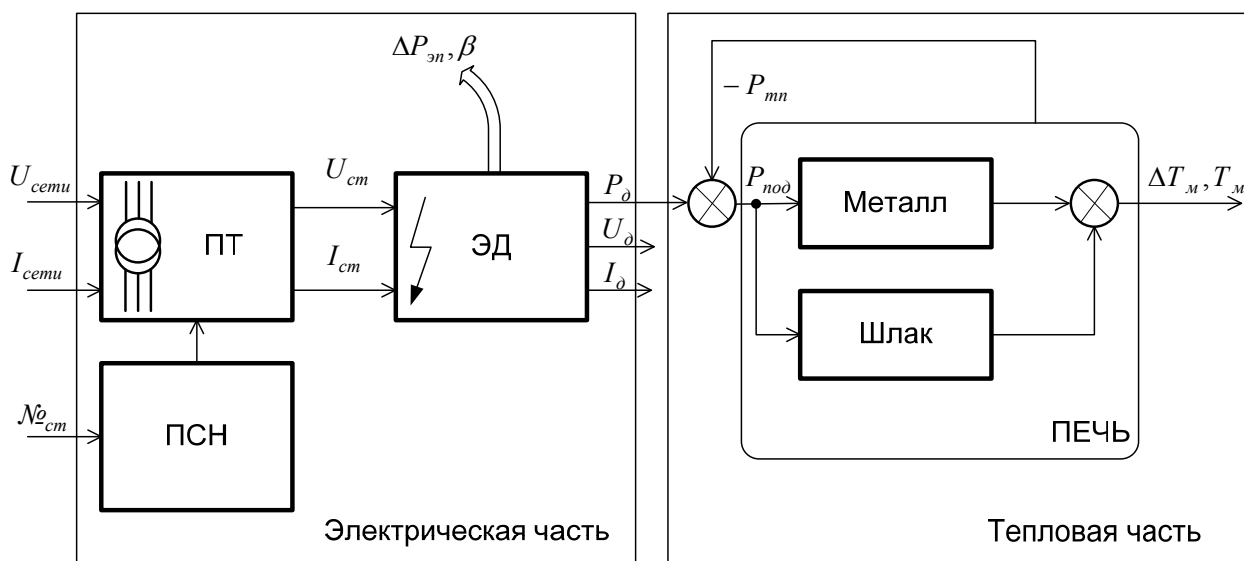


Рис. 1. Структурная схема комплекса «Печь-Ковш»

Предложенная структурная схема технологического комплекса «Печь-Ковш» (рис. 1.) позволяет построить математическую модель электротермических параметров плавки жидкого металла. Для реализации модели необходимо использование аналитических и экспериментальных методов.

Аналитический метод позволяет создать расчетно-теоретическую модель, протекающих процессов в исследуемом объекте в соответствии с уравнениями, описывающими физические законы [1, 4]. Коэффициентами данных уравнений являются физические параметры, полученные при теоретическом описании и характеризующие объект и рабочие процессы в нем: конструктивные элементы объекта, параметры рабочего тела, коэффициенты теплоотдачи и т. п. Такие модели наиболее полно раскрывают физическую сущность исследуемых процессов и позволяют анализировать изменение тех или иных параметров объекта и рабочего процесса. Однако в ряде случаев из-за отсутствия возможности непосредственного измерения контролируемого параметра достоверность данных о тех или иных характеристиках процесса, а также вычисленные значения коэффициентов в уравнении могут отличаться от истинных, вследствие чего модельные процессы могут в большей или меньшей мере отличаться от натуральных.

Вывод уравнений, описывающих электрические и тепловые параметры плавки металла, производится на основе теоретического анализа процессов, происходящих в исследуемом объекте, а также на основе известных конструктивных параметров и характеристик печи. Экспериментальная часть моделирования заключается в получении переходных характеристик объекта.

Нагрев жидкого металла в печи можно рассматривать как нагрев сосредоточенного тела. Тогда уравнение теплового баланса запишется в виде [2]:

$$c_m \cdot M_m \cdot \frac{\partial T_m}{\partial \tau} = Q_{ш.м.}(\tau) + Q_{дооб}(\tau) + \lambda_э \frac{P_{дм}(\tau) - P_{mn}(\tau)}{\pi_э^2}, \quad (1)$$

где c_m – удельная теплоемкость жидкого металла, $\frac{Дж}{кг \cdot ^\circ C}$;

M_m – масса жидкого металла, т;

$\lambda_э$ – настроечный коэффициент усвоения активной мощности;

$Q_{ш.м.}(\tau)$ – тепловой поток от шлака к металлу, Вт;

$Q_{дооб}(\tau)$ – тепловая мощность, выделяемая в металле за счет химических реакций, Вт;

$P_{mn}(\tau)$ – мощность тепловых потерь, Вт;

$P_{дм}(\tau)$ – мощность, передаваемая металлу непосредственно от дуги, Вт.

Анализ дифференциального уравнения (1) показывает, что для поддержания стабильной температуры металла необходимо, главным образом, решить задачу компенсации тепловых потерь соответствующим регулированием мощности на электрической дуге.

Следует также отметить, что температура металла T_m и скорость его нагрева ΔT_m зависят от массы жидкого металла M_m , массы добавок $M_{дооб}$ и величины подведенной мощности, которая определяется как разность мощностей на электрической дуге и тепловых потерь:

$$P_{нод}(\tau) = P_{д}(\tau) - P_{mn}(\tau). \quad (2)$$

Выделяемая на дуге мощность $P_{д}(\tau)$ вычисляется по известным значениям напряжения $U_{д}(\tau)$ и тока $I(\tau)$ с помощью выражения [1, 2]:

$$P_{\partial}(\tau) = U_{\partial}(\tau) \cdot I(\tau) = I^2(\tau) \left[\sqrt{\frac{U^2(\tau)}{I^2(\tau)} - x^2} - r \right]. \quad (3)$$

Мощность дуги в значительной степени определяет скорость нагрева металла и тепловые нагрузки в рабочем пространстве печи. Она может быть представлена как сумма мощностей, передаваемых металлу $P_{\partial m}(\tau)$, шлаку $P_{\partial ш}(\tau)$, электроду $P_{\partial э}(\tau)$, а также мощности открыто излучающей части столба $P_{\partial о}(\tau)$:

$$P_{\partial}(\tau) = P_{\partial э}(\tau) + P_{\partial ш}(\tau) + P_{\partial о}(\tau) + P_{\partial м}(\tau). \quad (4)$$

Величина мощности $P_{\partial э}(\tau)$, теряемая на электроде, вычисляется как доля мощности дуги $P_{\partial э}(\tau) = K_{э} \cdot P_{\partial}(\tau)$, где $K_{э}$ – коэффициент мощности, выделяемой в электродной области, значения которого находятся в диапазоне $0,05 \leq K_{э} \leq 0,1$. Введение $K_{э}$ обусловлено сложностью протекающих процессов, которые не удается удовлетворительно описать математическими зависимостями.

Величина мощности, рассеиваемая на нагрев шлака, может быть определена по формуле [3]:

$$P_{\partial ш}(\tau) = \frac{S_{ш}}{S_{\Sigma}} \cdot P_{см}(\tau), \quad (5)$$

где $S_{ш}$ – площадь боковой поверхности дуги по уровню шлака;

S_{Σ} – общая площадь поверхности дуги;

$P_{см}(\tau)$ – мощность, выделяемая в столбе дуги.

Параметры, входящие в выражение (5), определяются следующим образом. Предположим, что межэлектродный промежуток, в котором образуется дуга, имеет цилиндрическую форму с радиусом r_{∂} и высотой $h_{\partial} = \frac{U_{\partial} - U_a}{\alpha}$ (см. рис. 2). Тогда при толщине шлака

$h_{ш}$ площадь боковой поверхности дуги в шлаке составит:

$$S_{ш} = 2 \cdot \pi \cdot r_{\partial} \cdot h_{ш}. \quad (6)$$

Общая площадь поверхности дуги составит:

$$S_{\Sigma} = S_{э} + S_{м} + S_{ш} + S_{о}, \quad (7)$$

где $S_{м}$, $S_{э}$ – площадь пятен (излучаемой поверхности дуги) на металле и электроде ($S_{э} = S_{м} = \pi \cdot r_{\partial}^2$); $S_{о}$ – площадь боковой поверхности открытой части дуги ($S_{о} = 2\pi r_{\partial}(h_{\partial} + h_{ш})$).

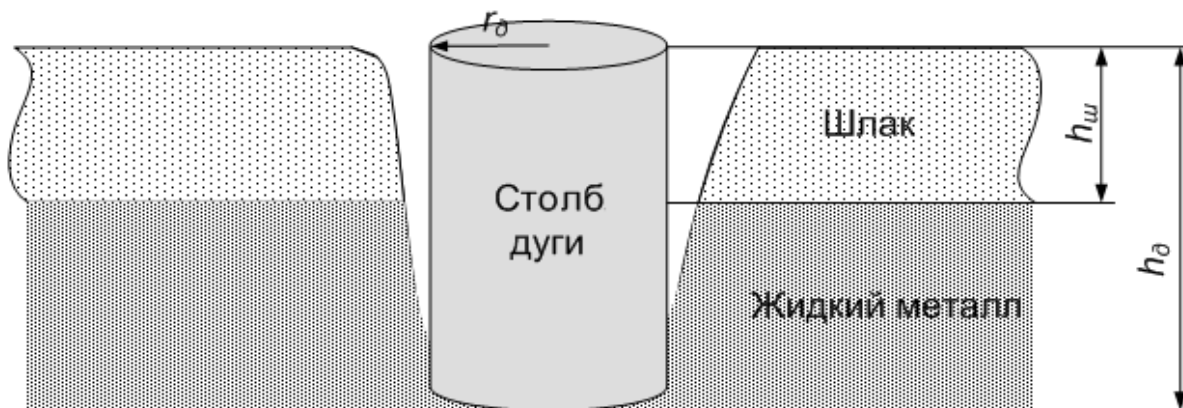


Рис. 2. Геометрические параметры электрической дуги

Расчет мощности $P_{\delta o}(\tau)$ открыто излучающей части столба выполняется по формуле:

$$P_{\delta o}(\tau) = \frac{S_o}{S_{\Sigma}} \cdot P_{cm}(\tau). \tag{8}$$

Полезная мощность, расходуемая на нагрев металла, определится из выражения:

$$P_{\delta m}(\tau) = U_a \cdot I_{\delta}(\tau) + \frac{S_m + S_{\delta}}{S_{\mu}} \cdot P_{cm}(\tau), \tag{9}$$

где S_{δ} – учитывает переотражение части энергии от торца электрода в металл;

U_a – анодно-катодное падение напряжения у поверхности металла, которое относительно мало (примерно 40 В);

$I_{\delta}(\tau)$ – сила тока на электрической дуге, А.

Произведя замену переменных, получим зависимости для определения мощностей, потребляемых на нагрев шлака, металла и открытое излучение:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\delta \mu}(\tau) = P_{cm}(\tau) \cdot \frac{h_{\mu}}{r_{\delta} + \frac{U_{\delta} - 2 \cdot U_a}{\alpha}}; \\ P_{\delta m}(\tau) = U_a \cdot I + P_{cm}(\tau) \cdot \frac{h_{\mu}}{r_{\delta} + \frac{U_{\delta} - 2 \cdot U_a}{\alpha}}; \\ P_{\delta o}(\tau) = P_{cm}(\tau) \cdot \frac{\frac{U_{\delta} - 2 \cdot U_a}{\alpha} - h_{\mu}}{r_{\delta} + \frac{U_{\delta} - 2 \cdot U_a}{\alpha}}, \end{array} \right. \tag{10}$$

где α – падение напряжения (мощности) на 1 см столба дуги в периоды плавки.

Значение α зависит от условий дугообразования и составляет:

в период: расплавления $100\text{--}250 \text{ В/см}$;

в окислительный период $15\text{--}38 \text{ В/см}$;

в восстановительный период $7\text{--}11 \text{ В/см}$ [1].

Если высота межэлектродного промежутка станет равной толщине шлака, выражения (10) упрощаются, так как $P_{до} = 0$.

В соответствии с проведенными расчетами по зависимостям (10) диаграмма распределения мощности на электрической дуге в восстановительный период плавки будет иметь вид, приведенный на рис. 3.

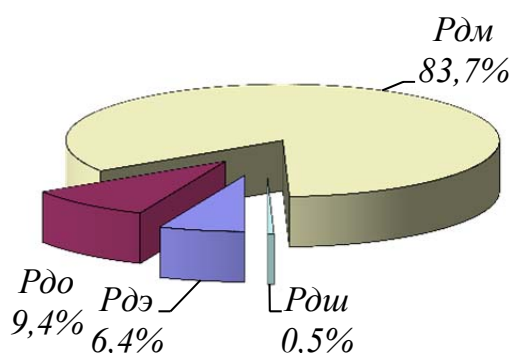


Рис. 3. Диаграмма перераспределения мощности на электрической дуге

ВЫВОДЫ

Полученные зависимости могут быть использованы для расчета оптимальных режимов нагрева расплава в дуговой сталеплавильной печи, а также для построения динамической модели электротермических процессов плавки в восстановительный период.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Игнатов И. И. Математическое моделирование и расчет дуговых и плазменных сталеплавильных печей : [сб. науч. тр. ВНИИЭТО / под ред. И. И. Игнатова]. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 72 с.
2. Егоров А. И. Основы теории управления / А. И. Егоров. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 504 с.
3. Разживин А. В. Математическое моделирование тепловых параметров восстановительного периода плавки / А. В. Разживин, А. Н. Обухов // Весник Донбасской государственной машиностроительной академии : тематический сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 1 (22). – С. 225–231.
4. Лазарева Т. Я. Основы теории автоматического управления: [учеб. пособие] / Т. Я. Лазарева, Ю. Ф. Мартымянов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. – 308 с.

Статья поступила в редакцию 11.03.2018 г.