

## УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОЙ РАБОТОЙ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ В УСЛОВИЯХ Пониженной производительности

Турулина Ю. О., магистрант; Лебедев А. Н., доц., к.т.н., доц.;

Бирюков А. Б., проф., д.т.н., проф.

(ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНР)

Нагрев металла перед прокаткой в основном осуществляется в проходных методических печах. В зависимости от производительности прокатного стана и требований, предъявляемых к нагретой заготовке, конструкция печей может претерпевать изменения, но, как правило, включает методическую, сварочную и томильную зоны.

Нагреваемые заготовки загружаются в неоттапливаемую методическую зону печи и постепенно продвигаются через сварочную и томильную зоны. В методической зоне происходит медленный нагрев заготовок за счет тепла продуктов сгорания топлива, поступающих из отапливаемой сварочной зоны для исключения термического напряжения.

В сварочных зонах, которых в зависимости от производительности печи может быть от одной до нескольких, за счет интенсивного нагрева заготовок, температура поверхности металла приближается к заданной.

Для получения заданного качества нагрева в томильной зоне осуществляется выравнивание температуры по объему заготовки и доведение до конечного значения. В отдельных случаях отсутствует необходимость наличия томильной зоны, заготовка – это термически тонкое тело.

Точное обеспечение заданной температуры металла и недопущение чрезмерной скорости его нагрева позволяют получить продукцию надлежащего качества и оптимизировать затраты.

При разработке режимов нагрева металла наиболее часто применяются инженерные методы расчета методических печей [1], либо создаются математические модели для расчета температурного состояния.

Применяемые инженерные методы расчета не обеспечивают достаточной точности определения режимных параметров. В частности, недостаточно точно и однозначно определяется температура уходящих газов на выходе из методической зоны печи.

В работе [2] предложено усовершенствование инженерного метода, позволяющего однозначно определять температуру уходящих газов.

В настоящей работе рассматривается случай, когда настроенная на оптимальный тепловой режим печь, в силу различного рода обстоятельств, должна работать в условиях пониженной производительности.

Задачей является получение режимных параметров, обеспечивающих экономный расход топлива и заданную температуру металла.

Последовательность получения режимных параметров сводится к следующему.

Производится перерасчет времени нагрева металла в печи в целом и в соответствующих зонах. Для примера рассмотрим трехзонную методическую печь.

Для начала определим новое значение скорости движения заготовок в печи по формуле:

$$v' = \frac{P' \cdot 10^3}{3600 \cdot d \cdot l_s \cdot \rho}, \quad (1)$$

где  $v'$  – скорость движения заготовок при пониженной производительности, м/с;

$P'$  – новое значение производительности печи, т/ч;

$d \cdot l_s$  – площадь поперечного сечения заготовки, м<sup>2</sup>;

$\rho$  – плотность металла, кг/м<sup>3</sup>.

Общее время нахождения металла в печи и по зонам определяется по формуле:

$$\tau' = \frac{L}{3600 \cdot v'}, \quad (2)$$

где  $\tau'$  – время нахождения металла в печи или в соответствующей зоне при пониженной производительности, ч;

$L$  – длина печи или соответствующей зоны, м.

С другой стороны, общее время нахождения металла в печи и по зонам определяется по формуле И.Д. Семикина [3]:

$$\tau' = \frac{\rho \cdot r_0 \cdot 10^3}{3600 \cdot K_1 \cdot \bar{q}} \cdot \Delta i, \quad (3)$$

где  $r_0$  – толщина прогреваемого слоя, м;

$K_1$  – коэффициент материальной нагрузки;

$\bar{q}$  – среднее значение плотности теплового потока в печи или в соответствующих зонах, Вт/м<sup>2</sup>;

$\Delta i$  – изменение энтальпии нагреваемого металла в печи в целом или в соответствующих зонах, кДж/кг.

Приравняв правые части уравнений (2) и (3) получаем значение  $\bar{q}$  по зонам, поскольку значение температур поверхности, оси и среднemasсовой температуры, а значит и  $\Delta i$  сохраняет свое значение при изменении производительности печи.

По рассчитанному среднему значению плотности теплового потока из формулы (3) для томильной зоны,  $\bar{q}_3$ , и заданному значению плотности теплового потока в конце томильной зоны определяем значение плотности теплового потока в конце сварочной зоны из выражения:

$$\bar{q}_3 = \frac{q_k + q_2}{2}, \quad (4)$$

где  $q_2$  – плотность теплового потока в конце сварочной зоны, Вт/м<sup>2</sup>;

$q_k$  – плотность теплового потока в конце томильной зоны, Вт/м<sup>2</sup>.

Исходя из рассчитанного значения плотности теплового потока в конце сварочной зоны аналогичным образом определяем значение плотности теплового потока в конце методической зоны из выражения:

$$\bar{q}_2 = \frac{q_1 + q_2}{2}, \quad (5)$$

где  $q_1$  – плотность теплового потока в конце методической зоны, Вт/м<sup>2</sup>.

Плотность теплового потока в начале методической зоны определяем из выражения:

$$\bar{q}_1 = \sqrt{q_0 \cdot q_1}, \quad (6)$$

где  $q_0$  – плотность теплового потока в начале методической зоны, Вт/м<sup>2</sup>.

Опираясь на полученные значения плотности теплового потока, определяем температуру печи в начале и конце каждой из зон по формуле:

$$t_{печ} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{q}{C_{экм}} + \left(\frac{t_n + 273}{100}\right)^4} - 273, \quad (7)$$

где  $t_{печ}$  – температура в соответствующей зоне печи, °С;

$q$  – плотность теплового потока в соответствующей зоне печи, Вт/м<sup>2</sup>;

$C_{зкм}$  – приведенный коэффициент излучения в соответствующей зоне печи, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);

$t_n$  – температура поверхности металла в соответствующей зоне печи, °С.

Приведенный коэффициент излучения,  $C_{зкм}$ , определяем для каждой зоны по формуле:

$$C_{зкм} = C_0 \cdot \varepsilon_m \cdot \frac{w + 1 - \varepsilon}{w + [\varepsilon_m + \varepsilon \cdot (1 - \varepsilon_m)] \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon}}, \quad (8)$$

где  $C_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела,  $C_0 = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);

$\varepsilon_m$ ,  $\varepsilon$  – степень черноты металла и газа для каждой из зон соответственно;

$w$  – степень развития кладки для каждой из зон.

Степень черноты углекислого газа, водяного пара и поправочный коэффициент на парциальное давление для водяного пара определим по формулам Маковского В.А. [4]:

$$\varepsilon_{CO_2} = \exp\{-[1,4918 + 0,3980 \cdot C_{CO_2}^{-0,2609} + (0,053 - 0,1239 \cdot C_{CO_2}^{0,1718}) \cdot \left(\frac{t_{печ}}{100}\right) + (0,003504 + 0,0009446 \cdot C_{CO_2}^{0,5470}) \cdot \left(\frac{t_{печ}}{100}\right)^2]\}, \quad (9)$$

$$\varepsilon_{H_2O} = \exp\left[0,5708 - 1,2016 \cdot C_{H_2O}^{-0,2146} - (0,0038 + 0,05133 \cdot C_{H_2O}^{-0,2105}) \cdot \left(\frac{t_{печ}}{100}\right)\right], \quad (10)$$

$$\beta = 1 + (-5,0 + 5,3114 \cdot C_{H_2O}^{-0,01191}) \cdot P_{H_2O}^{0,74 + 0,03705 \cdot C_{H_2O}^{-0,1561}}, \quad (11)$$

где  $\varepsilon_{CO_2}$ ,  $\varepsilon_{H_2O}$  – степень черноты углекислоты и водяного пара, соответственно;

$C_{CO_2}$ ,  $C_{H_2O}$  – параметр, учитывающий парциальное давление углекислоты и водяного пара, соответственно, м·кгс/см<sup>2</sup>;

$\beta$  – поправочный коэффициент на парциальное давление для водяного пара;

$P_{H_2O}$  – парциальное давление водяного пара, кгс/см<sup>2</sup>.

Степень черноты газа для каждой зоны определяем по формуле:

$$\varepsilon = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O} \cdot \beta \quad (12)$$

Таким образом, предлагаемый алгоритм расчета режимных параметров позволяет получать такое же тепловое состояние металла при пониженной производительности печи, как и в случае режима с номинальной скоростью нагрева. Полученные данные могут использоваться для определения граничных условий при решении дифференциального уравнения.

#### Перечень ссылок

1. Гусовский, В. Л. Методики расчета нагревательных и термических печей : учебно-справочное издание / В. Л. Гусовский, А. Е. Лифшиц. – Москва : Теплотехник, 2004. – 400 с.
2. Бирюков, А.Б. Повышение точности определения теплового состояния металла в методической зоне проходной печи при использовании инженерных методов / А.Б. Бирюков, А. Н. Лебедев, Ю. О. Турулина, С. А. Онищенко // Вестник. – 2017. – №1(9) – С. 5-10.
3. Недопёкин, Ф. В. Теоретические и прикладные аспекты теплопереноса / Ф. В. Недопёкин, С. И. Гинкул, Е. В. Новикова. – Донецк : ДонНУ, 2013. – 321 с.
4. Маковский, В. А. Алгоритмы управления нагревательными печами / В. А. Маковский, И. И. Лаврентик. – Москва : Металлургия, 1977. – 183 с.