

УДК 669.041

## К ОЦЕНКЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛООТДАЮЩЕГО ТЕЛА ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ГРАФИКА ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЙ НАГРЕВА И ТЕРМООБРАБОТКИ МЕТАЛЛА

Докт. техн. наук, проф. **НЕСЕНЧУК А. П.**,  
кандидаты техн. наук **РЫЖОВА Т. В.**, **КРАЕЦКАЯ О. Ф.**,  
магистры техн. наук **КОВАЛЕВ С. С.**, **БЕГЛЯК А. В.**

*Белорусский национальный технический университет,  
ОАО «Минский автомобильный завод»,  
УП «Авторемпромпроект»*

При построении (разработке) температурного графика нагрева металла под горячее формообразование и термическую обработку существенное значение имеет температура теплоотдающего тела. Величина этой температуры наряду с интенсификацией процессов теплообмена может оказать пагубное влияние на качество нагрева высокоуглеродистых и легированных сталей, а также процесс дальнейшего формообразования (ковка, штамповка, прокатка).

Реализация температурного графика теплотехнологии нагрева начинается сразу же при оценке величины потока теплоты к поверхности садки, куда входит

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{C_0 \varepsilon_{n_{\Gamma, \text{М}}} \left[ \left( \frac{T_{\Gamma}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{М}}}{100} \right)^4 \right] + C_0 \varepsilon_{n_{\text{кл, М}}} \left[ \left( \frac{T_{\text{кл}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{М}}}{100} \right)^4 \right]}{T_{\text{изл}} - T_{\text{М}}}, \quad (1)$$

$$\alpha_{\text{л}} = C_0 \varepsilon_{n_{\Gamma, \text{М, кл}}} \left[ \left( \frac{T_{\Gamma, \text{М, кл}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{М}}}{100} \right)^4 \right] \text{ при } T_{\Gamma, \text{М, кл}} = T_{\text{печи}};$$

$$q_{\text{л}} = C_0 \varepsilon_{\text{печ}} \left[ \left( \frac{T_{\text{печ}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{М}}}{100} \right)^4 \right] \text{ при } \varepsilon_{\text{печ}} = \varepsilon_{n_{\Gamma, \text{М, кл}}}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{n_{\Gamma, \text{М}}}$ ,  $\varepsilon_{n_{\text{кл, М}}}$  – степени черноты (приведенные значения) системы тел, участвующих в тепловом излучении «излучающий газ – поверхность металла» и «излучающая кладка (футеровка) – лучевоспринимающая поверхность металла»;  $T_{\Gamma}$ ,  $T_{\text{кл}}$ ,  $T_{\text{М}}$  – соответственно термодинамические темпера-

туры излучающих газов и кладки, а также поверхности нагреваемого металла;  $T_{\text{изл}}$  – температура излучающей системы;  $T_{\text{печ}}$  – термодинамическая температура системы серых тел (температура печи, технологической зоны рабочего пространства), К.

Как видно из (1) и (2), нагрев садки (металлических заготовок или изделий) осуществляется за счет первичного источника энергии (продуктов сгорания органического топлива) и «переизлучателя» энергии футеровочного слоя рабочей камеры технологической зоны. Иными словами, садка получает суммарный поток теплоты, температура которого называется температурой печи  $t_{\text{печ}}$ .

Наряду с (1) и (2) существует расчетная формула, позволяющая с достаточной точностью для инженерных расчетов находить значение теплового потока, не прибегая к величинам  $\varepsilon_{n_{г,м}}$ ,  $\varepsilon_{n_{кл,м}}$  и  $\varepsilon_{n_{г,м,кл}}$ , а следовательно, и значениям угловых коэффициентов  $\varphi$  системы серых тел. Эта формула имеет вид [1]

$$\alpha_{\text{печ}} = \frac{C_0 \varepsilon_m \varepsilon_r \frac{1}{\omega} (1 - \varepsilon_r) + 1}{\frac{1}{\omega} (1 - \varepsilon_r) [\varepsilon_m + \varepsilon_r (1 - \varepsilon_m)] + \varepsilon_r} \left[ \left( \frac{T_{\text{печ}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_m}{100} \right)^4 \right], \quad (3)$$

где  $\Delta T_{\text{печ}} (\Delta t_{\text{печ}})$  – температурный напор печи, К.

Обычно значение  $T_{\text{печ}}$  подчиняется неравенству  $T_m < T_{\text{печ}} < T_r$ . Поскольку степень черноты печных газов (продуктов сгорания органического топлива) мала ( $\varepsilon_r \cong 0,08-0,35$ ), а степень черноты поверхности футеровочного слоя кладки составляет величину порядка 0,80–0,95, значение температуры печи  $T_{\text{печ}}$  весьма близко к  $T_{\text{кл}}$ . В ряде случаев неравенство  $T_m < T_{\text{печ}} < T_r$  нарушается ( $T_r < T_{\text{кл}}$ ), и несоблюдение этого условия приводит к нарушению реализации температурного графика в условиях промышленной эксплуатации печи (рис. 1).

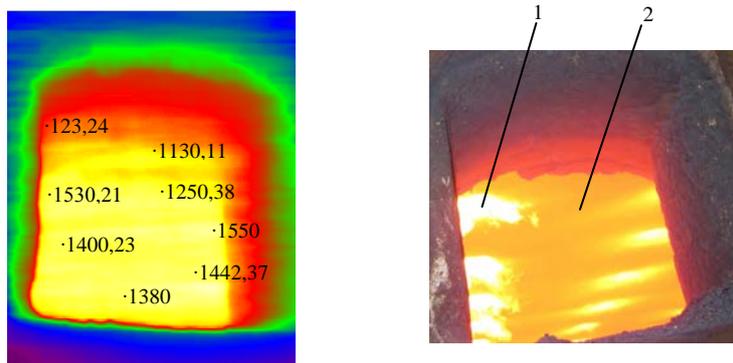


Рис. 1. Температура излучающей футеровки печи с шагающими балками (относительно излучающих стен с таким же футеровочным покрытием), по данным С. С. Ковалева и Т. В. Рыжовой: 1 – излучающая футеровка (горелочные камни) с температурой 1530–1550 °С; 2 – то же с температурой 1135–1350 °С

Также нарушения сказываются при нагреве садки, когда  $Vi > Vi_{кр}$ . В этих случаях существенно растет время выдержки  $\tau_{выд}$  и увеличивается удельный расход натурального топлива на нагрев. При этом определяющим фактором скорости нагрева и величину потока теплоты на поверхность садки является поток от поверхности излучающего слоя футеровочного материала рабочей камеры.

С целью повышения точности расчетов при разработке температурного графика, который в конечном итоге ложится в основу составления теплового баланса печи и оценку удельного расхода натурального топлива на нагрев, запишем расчетные формулы для нахождения  $\Delta T_{печ}(\Delta t_{печ})$ .

Теперь для плоскопараллельного расположения излучающей футеровки печи и нагреваемой поверхности садки запишем формулы для оценки приведенной степени черноты, входящей в (3).

Имеем в самом общем случае

$$\varepsilon_{n_{г,ф,м}} = \frac{\varepsilon_{г,ф}\varepsilon_{г,м} + \varepsilon_{г,ф}\varepsilon_{ф,м}\varphi_{м,ф} + \varepsilon_{г,м}\varepsilon_{ф,м}\varphi_{ф,м}}{\varepsilon_{г,ф} + \varepsilon_{ф,м}\varphi_{ф,м}}. \quad (4)$$

При  $\varphi_{м,м} = 0$ ,  $\varphi_{м,ф} = 1$

$$\varepsilon_{n_{г,ф,м}} = \frac{\varepsilon_{г,ф}\varepsilon_{г,м} + \varepsilon_{г,м}\varepsilon_{ф,м}\varphi_{ф,м}}{\varepsilon_{г,ф} + \varepsilon_{ф,м}\varphi_{ф,м}}. \quad (5)$$

При  $\varphi_{м,м} = 0$  и  $\varphi_{ф,ф} = 0$ , а также  $\varphi_{ф,м} = \varphi_{м,ф}$  будем иметь

$$\varepsilon_{n_{г,ф,м}} = \frac{\varepsilon_{г,ф}\varepsilon_{г,м} + \varepsilon_{г,ф}\varepsilon_{ф,м} + \varepsilon_{г,м}\varepsilon_{ф,м}}{\varepsilon_{г,ф} + \varepsilon_{ф,м}}. \quad (6)$$

При подстановке в (1)–(3) приведенных значений  $\varepsilon_{ф,м}$ ,  $\varepsilon_{г,м}$  и  $\varepsilon_{г,ф}$  используем общеизвестные формулы [2]:

$$\varepsilon_{ф,м} = \frac{\varepsilon_{ф}\varepsilon_{м}(1 - \varepsilon_{г})}{1 - (1 - \varepsilon_{г})^2(1 - \varepsilon_{ф})(1 - \varepsilon_{м})}; \quad (7)$$

$$\varepsilon_{г,м} = \frac{\varepsilon_{г}\varepsilon_{м}[1 + (1 - \varepsilon_{г})(1 - \varepsilon_{ф})]}{1 - (1 - \varepsilon_{г})^2(1 - \varepsilon_{ф})(1 - \varepsilon_{м})}; \quad \varepsilon_{г,ф} = \frac{\varepsilon_{г}\varepsilon_{ф}[1 + (1 - \varepsilon_{г})(1 - \varepsilon_{м})]}{1 - (1 - \varepsilon_{г})^2(1 - \varepsilon_{ф})(1 - \varepsilon_{м})}. \quad (8)$$

Также представим связь между температурами печи  $t_{печ}$  и излучающих газов  $t_{г}$ .

Имеем

$$\frac{T_{печ}^4 - T_{м}^4}{T_{г}^4 - T_{м}^4} = K_{печ}, \quad (9)$$

где  $K_{печ}$  – коэффициент, устанавливающий связь между значениями приведенных степеней черноты системы серых тел.

Имеем

$$T_{\text{печ}}^4 = T_{\text{м}}^4 + (T_{\text{г}}^4 - T_{\text{м}}^4)K_{\text{печ}}. \quad (10)$$

Определяем  $K_{\text{печ}}$  для плоскопараллельного расположения греющей футеровки и поверхности садки в соответствии с выражением

$$K_{\text{печ}} = \frac{\varepsilon_{\text{г,ф,м}}}{\varepsilon_{\text{м}}}.$$

При  $\varphi_{\text{м,м}} \neq 0$  и  $\varphi_{\text{ф,ф}} = 0$

$$K_{\text{печ}} = \frac{\varepsilon_{\text{г}}}{\varepsilon_{\text{г}} + \varphi_{\text{ф,м}}\varepsilon_{\text{м}}(1 - \varepsilon_{\text{м}})}. \quad (11)$$

При  $\varphi_{\text{м,м}} = 0$  и  $\varphi_{\text{ф,ф}} \neq 0$

$$K_{\text{печ}} = \frac{\varepsilon_{\text{г}} [1 + \varphi_{\text{ф,м}}(1 - \varepsilon_{\text{г}})]}{\varepsilon_{\text{г}} + \varphi_{\text{ф,м}}(1 - \varepsilon_{\text{г}})[1 - (1 - \varepsilon_{\text{г}})(1 - \varepsilon_{\text{м}})]}. \quad (12)$$

В (8) и (9) значения  $\varphi_{\text{ф,м}}$  находятся в соответствии с [2, с. 315].

Формулы, аналогичные (11)–(13), могут быть предложены для цилиндрической полости.

Расчеты, связанные с оценкой температуры печи  $t_{\text{печ}}$ , указывают, что при построении температурного графика и его практической реализации нужно в качестве температуры излучателя использовать значение  $t_{\text{печ}}$ . Как правило, это значение подчиняется неравенству  $t_{\text{ф}} > t_{\text{печ}} > t_{\text{г}}$ . Только в исключительных случаях, когда  $\varepsilon_{\text{г}} = 1$  и  $\varphi_{\text{печ}} = 1$ , имеем  $t_{\text{печ}} = t_{\text{г}}$  ( $T_{\text{печ}} = T_{\text{г}}$ ). В действительности  $\varepsilon_{\text{г}} \in (0,1-0,3)$ . Тогда  $T_{\text{печ}} > T_{\text{г}}$  ( $t_{\text{печ}} > t_{\text{г}}$ ) (рис. 1).

## ВЫВОД

В работе рассмотрена методика оценки температуры теплоотдающего тела  $t_{\text{печ}}$ , учитывающая температуры излучающей поверхности футеровки  $t_{\text{кл}}$ , самой нагреваемой садки  $t_{\text{м}}$  и излучающих газов  $t_{\text{г}}$ .

Приводится формула для расчета температуры теплоотдающего тела «газ – футеровка (кладка) – металл».

## ЛИТЕРАТУРА

1. В ы с о к о т е м п е р а т у р н ы е т е п л о т е х н о л о г и ч е с к и е п р о ц е с с ы и у с т а н о в к и: у ч е б. п о с о б и е / А. П. Несенчук [и др.]; под общ. ред. В. Г. Лисиенко. – Минск: Вышэйш. шк., 1988. – 320 с.
2. Т е п л о - и м а с с о о б м е н: у ч е б. п о с о б и е: в 2 ч. – Ч. 1 / Б. М. Хрусталева [и др.]; под общ. ред. А. П. Несенчука. – Минск: БНТУ, 2007. – 606 с.

Представлена кафедрой ПТЭ и ТТ

Поступила 06.12.2010