

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

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

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

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

где $\varepsilon_{n_{\text{ГМ}}}$, $\varepsilon_{n_{\text{КЛМ}}}$ – степени черноты (приведенные значения) системы тел, участвующих в тепловом излучении «излучающий газ – поверхность металла» и «излучающая кладка (футеровка) – лучевоспринимающая поверхность металла»; $T_{\text{Г}}$, $T_{\text{КЛ}}$, $T_{\text{М}}$ – 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 $\varepsilon_{n,m}$, $\varepsilon_{n_{\text{кл},m}}$ и $\varepsilon_{n_{\text{г},\text{м},\text{кл}}}$, а следовательно, и значениям угловых коэффициентов φ системы серых тел. Эта формула имеет вид [1]

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

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

Обычно значение $T_{\text{печ}}$ подчиняется неравенству $T_m < T_{\text{печ}} < T_g$. Поскольку степень черноты печных газов (продуктов сгорания органического топлива) мала ($\varepsilon_g \cong 0,08-0,35$), 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 $T_m < T_{\text{печ}} < T_g$ нарушается ($T_g < T_{\text{кл}}$), и несоблюдение этого условия приводит к нарушению реализации температурного графика в условиях промышленной эксплуатации печи (рис. 1).

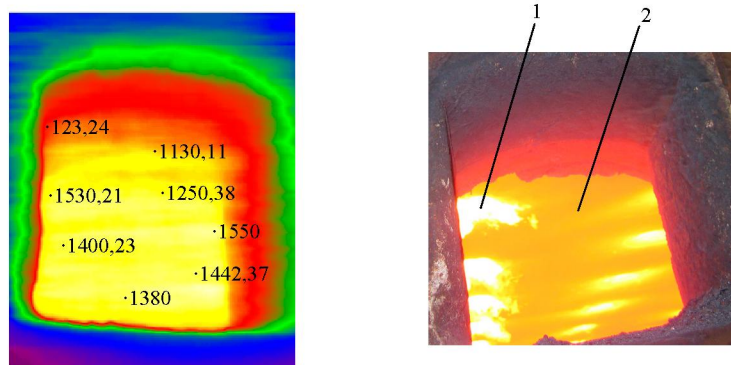


Рис. 1. Температура излучающей футеровки печи с шагающими балками (относительно излучающих стен с таким же футеровочным покрытием), по данным С. С. Ковалева и Т. В. Рыжовой: 1 – излучающая футеровка (горелочные камни) с температурой 1530–1550 °С; 2 – то же с температурой 1135–1350 °С

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

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

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

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

При $\Phi_{м,м} = 0$ и $\Phi_{ф,ф} = 0$, а также $\Phi_{ф,м} = \Phi_{м,ф}$ 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

$$K_{\text{печ}} = \frac{\varepsilon_{\text{Г},\text{Ф},\text{М}}}{\varepsilon_{\text{М}}}.$$

При $\varphi_{\text{М},\text{М}} \neq 0$ и $\varphi_{\text{Ф},\text{Ф}} = 0$

$$K_{\text{печ}} = \frac{\varepsilon_{\text{Г}}}{\varepsilon_{\text{Г}} + \varphi_{\text{Ф},\text{М}} \varepsilon_{\text{М}} (1 - \varepsilon_{\text{М}})}. \quad (11)$$

При $\varphi_{\text{М},\text{М}} = 0$ и $\varphi_{\text{Ф},\text{Ф}} \neq 0$

$$K_{\text{печ}} = \frac{\varepsilon_{\text{Г}} [1 + \varphi_{\text{Ф},\text{М}} (1 - \varepsilon_{\text{Г}})]}{\varepsilon_{\text{Г}} + \varphi_{\text{Ф},\text{М}} (1 - \varepsilon_{\text{Г}}) [1 - (1 - \varepsilon_{\text{Г}})(1 - \varepsilon_{\text{М}})]}. \quad (12)$$

В (8) и (9) значения $\varphi_{\text{Ф},\text{М}}$ 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