

Литература

1. Несенчук, А. П. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки / А. П. Несенчук, В.Г. Лисиенко, В. И. Тимошпольский [и др.]. – Минск, 1988. – 320 с.

2. Wunning, J. Рекуперативные горелки для прямого нагрева промышленных печей // Gaswarne International. – 1988. – т. 37. – Вып. – 10. – С. 515-519.

3. Scholz R., Maaß R., Alt R. Принцип рекуперативных горелок и основы для расчета // Industriefeuerung. – № 35. –с. 12-20.

4. Тимошпольский, В. И. Расчет оптимальной температуры подогрева воздуха в рекуператоре на примере действующей термической печи современного машиностроительного завода с технико-экономической точки зрения / Тимошпольский В.И. и [др.] // Литье и металлургия. – 2008. – №2. – С. 119–124.

УДК 621.331:536.33

В.И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, д-р техн. наук,
П.Э. РАТНИКОВ, канд. техн. наук,
С.М. КОЗЛОВ, канд. техн. наук (БНТУ),
А.В. МАТОЧКИН (ГНПО «Белстанкоинструмент»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ СКОРОСТНОГО НАГРЕВА МЕТАЛЛА ПРИ ОГРАНИЧЕНИЯХ НА ТЕРМИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Как известно, повышение содержания углерода и легирующих элементов в стальных слитках и заготовках приводит к повышению их склонности к трещинообразованию при нагреве и термической обработке вследствие того, что значения допустимого температурного перепада по сечению у таких марок стали значительно меньше, чем у рядовых углеродистых марок. К тому же, стоимость легированных сталей напрямую зависит от количества легирующих элементов и может превышать 500 – 700 долларов США за 1 тонну. Поэтому брак, возникающий в стальных слитках и заготовках в

процессах нагрева и термообработки (особенно легированных марок стали), существенным образом влияет на рентабельность продукции и, как следствие, рентабельность производства.

Все это приводит к необходимости разработки алгоритма управления нагревом стали (особенно высоколегированных марок стали) по критерию так называемых «допустимых напряжений» (при этом температурный перепад по сечению заготовок не должен превышать допустимого).

Математическая модель радиационно-конвективного нагрева металла формулируется следующим образом [1–5].

Уравнение теплопроводности при условии зависимости теплотехнических свойств материала от температуры

$$c_p^m(T_m)\rho_m(T_m)\frac{\partial T_m(\vec{r},t)}{\partial t} = \nabla(\lambda_m(T_m)\nabla T_m(\vec{r},t)), \quad (1)$$

где $\vec{r} = (x, y, z)$ – текущая координата точки, $T_m(\vec{r}, t)$ – температура материала в точке с координатами \vec{r} в момент времени t .

Начальное условие определяется исходным распределением температуры в теле:

$$T_{\text{мет}}(\vec{r}, 0) = T_{\text{мет}0} = \text{const}, \quad (2)$$

В общем случае, когда нагрев осуществляется за счет радиационного и конвективного нагрева, граничные условия к уравнению можно представить в виде

$$q_s(\vec{r}, t) = -\lambda_m(T)\frac{\partial T_m(\vec{r}, t)}{\partial \vec{n}} \Big|_{\vec{r} \in B} = \alpha_g(T_g - T_m(\vec{r}, t)) + q_{\text{res}}(\vec{r}), \quad (3)$$

где \vec{n} – внешняя нормаль к границе тела; T_g – температура печной среды, контактирующей с рассматриваемым телом; α_g – коэффициент теплообмена тела с печной средой;

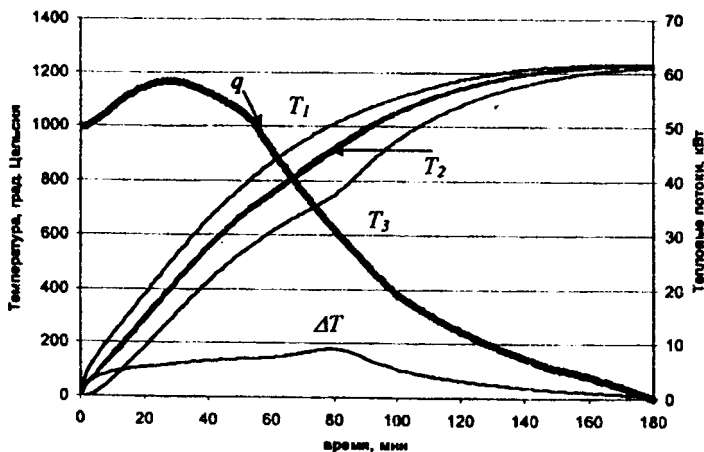
$$q_{res}(\vec{r}) = - \int_0^{\infty} \epsilon_{\lambda} \left(\int_{2\pi} I_{\lambda}(\vec{r}, \vec{l}) \cdot (\vec{l} \cdot \vec{n}) d\Omega - \pi B_{\lambda}(T_m(\vec{r})) \right) d\lambda \quad \text{— плотность}$$

результатирующего радиационного потока на поверхность тела. При струйном нагреве последнее слагаемое не учитывается.

Дополнительное условие, учитывающее ограничение на величину термических напряжений, имеет вид:

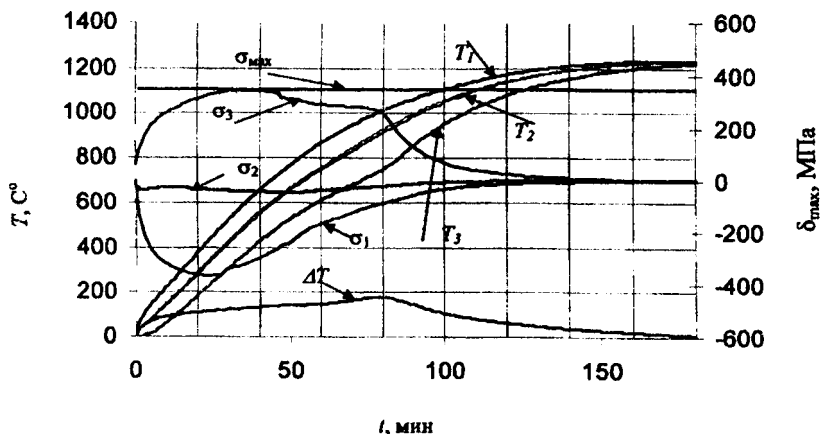
$$\sigma(\vec{r}, T) \leq k \cdot \sigma_{пр}(\vec{r}, T), \quad (4)$$

где $\sigma(\vec{r}, T)$ — текущее значение тензора термических напряжений в данной точке; $\sigma_{пр}(\vec{r}, T)$ — предел прочности рассматриваемой марки стали при данной температуре; k — коэффициент запаса прочности (выбирается исследователем, в нашем случае принимаем равным 0,6–0,75).



q — удельный тепловой поток на металл, Вт/м²; T_1, T_2, T_3 — соответственно температуры угла, середины грани и центра заготовки; ΔT — температурный перепад по сечению заготовки

Рисунок 1 — Динамика теплового потока на металл и температура в характерных точках заготовки сечением 250×300 мм из стали 45X при симметричном форсированном нагреве с учетом ограничений на термические напряжения



$T_1, T_2, T_3, \Delta T$ – тоже, что и на рисунке 1; σ_{\max} – максимально допустимый уровень растягивающих напряжений; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – соответственно температурные напряжения, возникающие в характерных точках заготовки (угол, центр грани и центр заготовки)

Рисунок 2 – Динамика температуры и напряжений в характерных точках заготовки при тех же условиях

Алгоритм разработки форсированных режимов нагрева стальных заготовок при ограничениях на термические напряжения включает:

- выбор типового нагревательного агрегата, представляющего данный тип печей в промышленном комплексе республики, а также наиболее представительных марок стали и типоразмеров заготовок;
- расчет оптимальных тепловых потоков с точки зрения быстрого действия нагрева металла с учетом ограничений по допустимым напряжениям в заготовке (4);
- задание максимальной скорости нагрева. Если в процессе нагрева температурные напряжения превышают заданное значение, то величина теплового потока на металл снижается на определенное значение (шаг), а если не превышают – повышается на определенный шаг. При этом учитывается, что температура греющей среды лимитируется не только температурным перепадом по сечению заготовки, но и применяемыми огнеупор-

ными материалами и футеровкой (отклонения от эскизного графика температуры не превышает заданный предел, например 150 °С);

- при достижении поверхностью заготовки конечной температуры (в соответствии с технологией нагрева) критерием окончания процесса нагрева служит попадание температурного поля заготовки в заданный диапазон.

Таким образом, в результате расчетов определено оптимальное распределение теплового потока на металл во времени. На основании расчетного времени нагрева заготовок можно определить требуемую скорость перемещения заготовок в печном пространстве.

В качестве иллюстрации приведенного алгоритма представлен расчет форсированного режима нагрева непрерывно-литых заготовок сечением 250×300 мм из стали 45Х в нагревательной печи с шагающим подом. Реализация математической модели (1) – (4) осуществляется методом конечных разностей (явная схема) [6].

Предел прочности стали 45Х согласно данным работ [7] составляет 570 МПа. Коэффициент запаса прочности в уравнении (4) примем равным 0,6. Соответственно максимально-допустимые термические напряжения будут равны 350 МПа.

Результаты расчетов приведены на рисунках 1 и 2. На рисунке 1 представлены динамики тепловых потоков и значений температур в характерных точках сечения заготовки (угол, центр грани и центр заготовки) при форсированном режиме нагрева. На рисунке 2 показаны максимальные растягивающие и сжимающие термальные напряжения (в соответствии с распределением температур, представленных на рисунке 1).

Таким образом в работе предложен алгоритм управления нагревом модель расчета стальных слитков и заготовок по критерию максимально допустимых термических напряжений. Предложенная математическая модель и алгоритм могут быть использованы при расчетах форсированных режимов нагрева металла в печах с шагающими балками (шагающим подом) с целью повышения производительности тепловых агрегатов.

Литература

1. Тимошпольский, В. И. Разработка физико-математической модели радиационного теплопереноса в печах с учетом геометрии стальных заготовок. Сообщение 1. Теоретические основы и методы решения физико-математической модели / В.И. Тимошпольский, М.Л. Герман, Д.Н. Андрианов [и др.] // Литье и металлургия. – 2004. – № 4. – С. 23–30.

2. Тимошпольский, В. И. Разработка физико-математической модели радиационного теплопереноса в печах с учетом геометрии стальных заготовок. Сообщение 2. Расчет спектрального коэффициента поглощения печной среды / В.И. Тимошпольский, М.Л. Герман, Д.Н. Андрианов [и др.] // Литье и металлургия. – 2004. – № 4. – С. 31–34.

3. Тимошпольский, В. И. Численное решение уравнения переноса излучения в поглощающей, излучающей и рассеивающей среде со сложной 3-D геометрией / В.И. Тимошпольский, М.Л. Герман, П.С. Гринчук, А.Н. Ознобишин // Инженерно-физический журнал. – 2005. – Т. 78. – № 1. – С.138–147.

4. Герман, М. Л. Расчет характеристик переноса теплового излучения в рабочем пространстве кольцевой печи / М.Л. Герман, В.И. Тимошпольский, П.С. Гринчук [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2005. – Т. 78. – № 3. – С.3–14.

5. Математическое моделирование сопряженного теплообмена в газопламенных печах прокатного производства / В.И. Тимошпольский, М.Л. Герман, И.А. Трусова и др. // Респ. межвед. сб. науч. трудов Металлургия. – Вып. 29. – Минск: Выш. шк., 2005. – С.44–49.

6. Самойлович, Ю. А. Нагрев стали: Справ. пособие / Ю.А. Самойлович, В.И. Тимошпольский – Минск: Выш. шк., 1990. – 314 с.

7. Стали и сплавы. Марочник: Справочное издание / В.Г. Сорокин [и др.]; науч. ред. В.Г. Сорокин, М.А. Гервасьев – М.: Интернет-Инжиниринг, 2001. – 608 с.