

## Расчёт охлаждения металла при заливке его в песчаноглинистую форму

Выведены формулы для расчёта охлаждения металла в литниковой системе и в литейной полости при заливке формы. Приведены примеры практического применения формул.  
заливка, металл, охлаждение

При определении оптимальной температуры заливки металла в литейную форму необходимо знать, на сколько градусов охладится металл при заливке. Однако, из-за отсутствия простых и достаточно точных методик соответствующих расчётов такие задачи, как правило, не ставятся и не решаются. Более того, периодом заливки часто пренебрегают, полагая, что эта операция осуществляется мгновенно, а в некоторых случаях не учитывают даже период отвода теплоты перегрева, объединяя последнюю с теплотой кристаллизации металла [1, стр. 53].

Ниже излагается методика расчёта степени охлаждения металла за время его заливки в наиболее распространённую песчаноглинистую форму.

Учитывая то обстоятельство, что теплопроводность металлов в десятки и сотни раз превышает теплопроводность песчаноглинистой формы, температура  $t_{пов}$  её поверхностного слоя, контактирующего с металлом, практически равна температуре металла и, таким образом, можно принять, что передача теплоты от металла к форме осуществляется при граничных условиях первого рода ( $t_{пов} = const$ ).

Как показано в работе [2], в этом случае в момент времени  $\tau$  плотность теплового потока  $q_{п}$  через границу «металл-форма» можно представить соотношением

$$q_{п} = (t_{пов} - t_{ф})b / \sqrt{\pi\tau}, \quad (1)$$

где  $t_{ф}$  – начальная температура формы,  $^{\circ}C$ ;

$b$  – коэффициент термоинерции материала формы,  $Дж/м^2К \cdot c^{1/2}$ ;

$\tau$  – время, прошедшее от начала контакта металла с формой.

Согласно уравнению (1) величина  $q_{п}$  уменьшается со временем обратно пропорционально корню квадратному из последнего. Причина этого явления – уменьшение со временем модуля градиента температуры на границе “металл - форма”.

**Охлаждение металла в литниковой системе.** Среднее на интервале  $\tau = 0K$   $\tau_{зал}$  значение плотности теплового потока от металла к форме находим, воспользовавшись теоремой о среднем [3] и зависимостью  $q_{л}(\tau)$ , представленной уравнением (1):

$$\bar{q}_{л} = \frac{1}{\tau_{зал}} \cdot \frac{b}{\sqrt{\pi}} (t_{пов,л} - t_{ф}) \int_0^{\tau_{зал}} \frac{d\tau}{\sqrt{\tau}}, \quad (2)$$

где  $\tau_{зал}$  – время заливки, с;

$\bar{t}_{\text{пов,л}}$  – средняя в пределах литниковой системы температура на границе “металл - формовочная смесь”, °С.

Величину  $\bar{t}_{\text{пов,л}}$  можно представить в виде:

$$\bar{t}_{\text{пов,л}} = t_3 - 0,5\Delta t_{\text{л}}, \quad (3)$$

где  $t_3$  – температура заливки, равная температуре металла на входе в литниковую систему, °С;

$\Delta t_{\text{л}}$  – разность начальной  $t_3$  и конечной  $t_{\text{л}}$  температур металла в литниковой системе при заливке:

$$\Delta t_{\text{л}} = t_3 - t_{\text{л}}. \quad (4)$$

Проинтегрировав уравнение (2), получаем формулу для расчёта средней плотности теплового потока в литниковой системе в период заливки:

$$\bar{q}_{\text{л}} = \frac{2b}{\sqrt{\pi\tau_{\text{зал}}}} (\bar{t}_{\text{пов,л}} - t_{\text{ф}}). \quad (5)$$

Сравнив уравнения (1) и (5), видим, что среднее на интервале  $\tau = 0$  К  $\tau_{\text{зал}}$  значение плотности теплового потока равно удвоенному значению этой величины в момент  $\tau = \tau_{\text{зал}}$ .

Чтобы найти выражение для количества теплоты, передаваемой в литниковой системе от металла к форме в процессе заливки, нужно правую часть уравнения (5), с учётом соотношений (3) и (4), умножить на площадь теплообмена в литниковой системе  $F_{\text{л}}$  и на время заливки  $\tau_{\text{зал}}$ :

$$Q_{\text{л}} = \frac{2b}{\sqrt{\pi}} [(t_3 - 0,5\Delta t_{\text{л}}) - t_{\text{ф}}] F_{\text{л}} \sqrt{\tau_{\text{зал}}}. \quad (6)$$

Рассматривая  $Q_{\text{л}}$  как теплоту, теряемую металлом, можно записать:

$$Q_{\text{л}} = mc\Delta t_{\text{л}}, \quad (7)$$

где  $m$  и  $c$  – металлоёмкость формы и теплоёмкость металла.

Приравняв правые части уравнений (6) и (7) и выразив затем  $\Delta t_{\text{л}}$ , после преобразований находим формулу для расчёта изменения температуры металла в литниковой системе за время заливки:

$$\Delta t_{\text{л}} = \frac{t_3 - t_{\text{ф}}}{\frac{mc}{2bF_{\text{л}}} \sqrt{\frac{\pi}{\tau_{\text{зал}}}} + 0,5}. \quad (8)$$

**Пример 1.** Рассчитать  $\Delta t_{\text{л}}$  для следующих условий: металл – алюминиевый сплав; металлоёмкость формы  $m = 17,6$  кг; общая поверхность теплообмена между металлом и формой  $F = 0,145$  м<sup>2</sup>, в том числе для литниковой системы  $F_{\text{л}} = 0,05$  м<sup>2</sup>; продолжительность заливки  $\tau_{\text{зал}} = 10$  с; начальные температуры: металла  $t_3 = 750$  °С и

формы  $t_{\phi} = 20^{\circ}\text{C}$ ; теплоёмкость жидкого металла  $C = 1290 \text{ Дж/кг}\cdot\text{K}$ ; плотность жидкого металла  $\rho = 2380 \text{ кг/м}^3$ ; коэффициент термоинерции материала формы  $b = 1400 \text{ Дж/м}^2\cdot\text{K}\cdot\text{с}^{1/2}$ .

Решение. По формуле (8) рассчитываем  $\Delta t_{\Pi}$ :

$$\Delta t_{\Pi} = \frac{750 - 20}{\frac{17,6 \cdot 1290}{2 \cdot 1400 \cdot 0,05} \sqrt{\frac{\pi}{10}} + 0,5} \cong 8^{\circ}\text{C}.$$

**Охлаждение металла в полости литейной формы.** Поступающий в литниковую чашу металл практически мгновенно попадает в полость формы, где, поднимаясь и контактируя с формой, отдаёт ей некоторое количество теплоты в течение всего периода заливки. При этом поверхность теплообмена изменяется от нуля до величины поверхности  $F_{\Pi}$ , ограничивающей литейную полость. Средняя величина поверхности теплообмена в литейной полости  $\bar{F}_{\Pi}$  в период заливки составляет половину от общей поверхности  $F_{\Pi}$ :

$$\bar{F}_{\Pi} = F_{\Pi} / 2. \quad (9)$$

Величину среднего за период заливки значения плотности теплового потока можно определить по формуле (5), заменив в ней величину  $\bar{t}_{\text{пов,л}}$  на  $\bar{t}_{\text{пов,л}}$ :

$$\bar{q}_{\Pi} = \frac{2b}{\sqrt{\pi\tau_{\text{зал}}}} (\bar{t}_{\text{пов,л}} - t_{\phi}), \quad (10)$$

где  $\bar{t}_{\text{пов,л}}$  – средняя за период заливки температура на границе «металл-формовочная смесь» для литейной полости,  $^{\circ}\text{C}$ .

Значение  $\bar{t}_{\text{пов,л}}$  может быть найдено как полусумма начальной  $t_{\text{л}}$  и конечной  $t_{\Pi}$  температур металла при заливке:

$$\bar{t}_{\text{пов,л}} = 0,5(t_{\text{л}} + t_{\Pi}) = t_{\text{л}} - 0,5\Delta t_{\Pi}, \quad (11)$$

где  $\Delta t_{\Pi}$  – изменение температуры металла в литейной полости в период заливки.

Величина  $\Delta t_{\Pi}$  определяется соотношением:

$$\Delta t_{\Pi} = t_{\text{л}} - t_{\Pi}. \quad (12)$$

Теплота, теряемая металлом в литейной полости при заливке, может быть представлена как произведение  $\bar{q}_{\Pi}$  (формула (10) с учётом соотношения (11)),  $\bar{F}_{\Pi}$  (формула (9)) и  $\tau_{\text{зал}}$ . После преобразований получаем:

$$Q_{\Pi} = \frac{b}{\sqrt{\pi}} (t_{\Pi} - 0,5\Delta t_{\Pi} - t_{\phi}) F_{\Pi} \sqrt{\tau_{\text{зал}}}. \quad (13)$$

Величина  $Q_{\Pi}$  связана с изменением температуры металла в полости формы при заливке:

$$Q_{\Pi} = mc\Delta t_{\Pi}. \quad (14)$$

Приравняв правые части уравнений (13) и (14) и выразив из полученного соотношения величину  $\Delta t_{\pi}$ , после преобразований находим расчётное уравнение для её определения:

$$\Delta t_{\pi} = \frac{t_{\pi} - t_{\phi}}{\frac{mc}{bF_{\pi}} \sqrt{\frac{\pi}{\tau_{\text{зал}}} + 0,5}}. \quad (15)$$

Пример 2. Рассчитать  $\Delta t_{\pi}$ , воспользовавшись данными предыдущего примера.

Решение. Подставляем в уравнение (15) численные значения входящих в него величин:

$$\Delta t_{\pi} = \frac{742 - 20}{\frac{17,6 \cdot 1290}{1400 \cdot 0,095} \sqrt{\frac{\pi}{10} + 0,5}} \cong 7 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

### **Выводы**

Интегрированием дифференциального уравнения теплопроводности при граничных условиях первого рода, характерных для теплового взаимодействия жидкого металла с песчаноглинистой формой, получены выражения для определения абсолютных и средних плотностей тепловых потоков через границу “металл-форма”. При использовании этих выражений с учётом специфики теплообмена в литниковой системе и в литейной полости найдены формулы для расчёта охлаждения металла в этих частях литейной формы при её заливке металлом. Приведены примеры практического применения полученных формул.

### **Список литературы**

1. Специальные способы литья: Справочник / В.А. Ефимов, Г.А. Анисович, В.Н.Бабич и др.; Под общ. ред. В.А. Ефимова. – М.: Машиностроение, 1991. – 436 с.
2. Сабірзянов Т.Г., Кропівний В.М. Теплотехніка ливарних процесів: Навчальний посібник. – Кіровоград: КНТУ, 2005. – 402 с.
3. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М.: Гостехтеоретиздат, 1953. – 608 с.

*Т. Сабірзянов*

#### **Розрахунок охолодження металу при заливанні його у піщаноглинисту форму**

Виведені формули для розрахунку охолодження металу в ливниковій системі та у ливарний порожнечі при заливанні форми металом. Наведені приклади практичного використання формул.

*T. Sabirjanov*

#### **The calculation of a metal cooling at casting in a sandclay form**

The formulas for calculation of a metal cooling at casting in a sandclay form are obtained. Examples of practical useful of the formulas are given.

Одержано 21.02.11