

## О СМЕЩЕНИИ ТЕПЛООВОГО ЦЕНТРА ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ НЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ

Канд. техн. наук, доц. ДЕМЧЕНКО Е. Б.,  
чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. МАНУКОВИЧ Е. И.

Белорусский национальный технический университет,  
Институт технологии металлов НАН Беларуси (Могилев)

Одним из важных результатов совместного действия усадки и термоконвективных потоков на процесс затвердевания отливки при горизонтальном непрерывном литье является смещение вверх теплового центра отливки относительно геометрического. Установлено, что вдоль теплового центра концентрируются усадочная пористость и осевая ликвация, создающие зону физической и химической неоднородности [1, 2], которая при значительном смещении центра может выйти на поверхность при горячем пластическом деформировании [3]. Особенно это характерно для литья тонких слябов из стали и цветных металлов. Авторы [4] полагают, что величина смещения зависит от радиуса и скорости вытяжки отливки и не превышает значения 10 % диаметра. Смещение теплового центра не влияет на качество изделий, изготовленных прессованием, волочением или механической обработкой. Однако независимо от наличия ликвации и осевой пористости оно приводит к возникновению неоднородности структуры и свойств по периметру и длине заготовки, особенно при литье заготовок сложного профиля, которую необходимо учитывать при управлении процессом структурообразования отливки.

Практически все исследования кинетики смещения теплового центра основаны на анализе результатов экспериментов, полученных с помощью серных отпечатков [3], выливания жидкого остатка [5] или на определении эмпирических зависимостей [4], связывающих тепловые и технологические параметры процесса литья при отсутствии математического аппарата.

Рассмотрим возможность создания математической модели для расчета смещения теплового центра на примере литья сплошной горизонтальной отливки.

На рис. 1 область, ограниченная треугольником  $AOB$ , является жидкой фазой отливки (при отсутствии смещения теплового центра глубиной лунки  $h$ ). Проведем некоторые геометрические построения. Сместив треугольник  $AOB$  вверх на величину смещения теплового центра  $\Delta R$ , получим треугольник  $A'O'B'$ . Продолжим линию  $O'B'$  до пересечения с нижней образующей отливки в точке  $C$  и найдем точку пересечения  $C'$  линии верхней образующей отливки с линией  $O'A'$ . Соединив точки  $C$  и  $C'$ , получим треугольник  $CO'C'$ , который будет представлять собой область жидкой фазы отливки при смещении теплового центра.

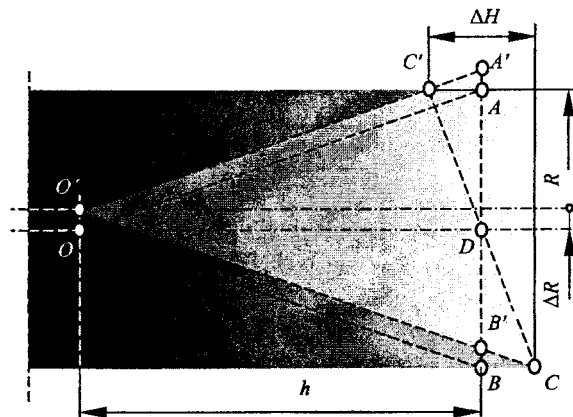


Рис. 1. Схема к расчету величины  $\Delta R$  смещения теплового центра

Из построения видно, что треугольники  $AOB$  и  $CO'C'$  равны. Следовательно, количество жидкой фазы до и после смещения теплового центра не изменилось. Условие равенства количества жидкой фазы позволит воспользоваться известными зависимостями для определения глубины жидкой лунки  $h$  и величины запаздывания затвердевания  $\Delta H$  [6] без каких-либо условий и ограничений.

Очевидно, что величина запаздывания затвердевания в верхней зоне кристаллизатора

составляет  $\Delta H = 2C'A$ . Из подобия треугольников  $AOD$  и  $A'CA$  следует:

$$\frac{OD}{C'A} = \frac{AD}{A'A} \text{ или } \frac{2h}{\Delta l} = \frac{R}{\Delta R}$$

Отсюда

$$\Delta R = \frac{\Delta HR}{2h} \quad (1)$$

Величина запаздывания затвердевания  $\Delta H$  может быть определена из уравнения [7]

$$\Delta H = \frac{T_{\text{зал}} - T_{\text{кр}}}{T_{\text{зал}} - T_c} \frac{R\gamma'_1 c'_1 w_{\text{ср}}}{2\alpha} \quad (2)$$

где  $T_{\text{зал}}$ ,  $T_{\text{кр}}$ ,  $T_c$  – соответственно температуры расплава, кристаллизации и охлаждающей среды;  $\gamma'_1$  – удельный вес;  $c'_1$  – теплоемкость жидкого расплава;  $w_{\text{ср}}$  – средняя скорость литья;  $\alpha$  – коэффициент теплопередачи от жидкого расплава к охлаждающей среде. Глубина жидкой лунки отливки  $h$  описывается известным соотношением [8]

$$h = \frac{R^2 \gamma_1 w_{\text{ср}} J}{9\lambda_1 (T_{\text{кр}} - T_{1\text{п}})} \quad (3)$$

где  $\gamma_1$  – удельный вес твердого расплава;  $J = r + \frac{1}{2}c_1(T_{\text{кр}} - T_{1\text{п}})$  – разница в теплосодержании жидкого и твердого расплавов;  $c_1$  – теплоемкость твердого расплава;  $\lambda_1$  – теплопроводность материала отливки;  $T_{1\text{п}}$  – температура поверхности отливки.

После подстановки (2) и (3) в (1) и несложных преобразований окончательно получим уравнение для расчета величины смещения теплового центра  $\Delta R$

$$\Delta R = 2,25 \frac{\lambda_1 \gamma'_1 c'_1 \Delta T_{\text{пер}}}{\alpha \gamma_1 J} \Theta_{1\text{п}} \quad (4)$$

где  $\Delta T_{\text{пер}} = T_{\text{зал}} - T_{\text{кр}}$  – температура перегрева расплава;  $\Theta_{1\text{п}} = \frac{T_{\text{кр}} - T_{1\text{п}}}{T_{\text{зал}} - T_c}$  – безразмерный температурный критерий.

Входящий в конечное уравнение (4) коэффициент теплопередачи  $\alpha$  легко можно выразить через удельный тепловой поток  $q_{2\text{п}}$ , отводимый в соответствующей зоне кристаллизатора

$$\alpha = \frac{q_{2\text{п}}}{T_{1\text{п}} - T_c}$$

Математическая модель кинетики смещения теплового центра (4) дает возможность прогнозировать течение процесса структурообразования и упрощает расчет ряда технологических параметров процесса литья. Анализ показывает, что величина смещения теплового центра  $\Delta R$  определяется тепловыми параметрами процесса литья: удельным тепловым потоком в кристаллизаторе  $q_{2\text{п}}$ , температурами перегрева расплава  $\Delta T_{\text{пер}}$  и поверхности отливки  $T_{1\text{п}}$ , и не зависит от скорости литья.

На рис. 2 представлен расчет кинетики смещения теплового центра  $\Delta R$  сплошной чугунной отливки диаметром 0,100 м в зависимости от температуры поверхности отливки  $\Delta R = f(T_{1\text{п}})$ . Термофизические коэффициенты для расчета взяты из [6]:  $\lambda_1 = 35,0$  Вт/(м·град);  $c'_1 = 837,4$  Дж/(кг·град);  $c_1 = 753,6$  Дж/(кг·град);  $\gamma'_1 = 6800$  кг/м<sup>3</sup>;  $\gamma_1 = 7200$  кг/м<sup>3</sup>;  $T_{\text{зал}} = 1320$  °C;  $T_{\text{кр}} = 1140$  °C;  $T_{1\text{п}} = 1100$  °C;  $T_c = 20$  °C;  $r = 215000$  Дж/кг;  $q_{2\text{п}} = 901000$  Вт/м<sup>2</sup>;  $w_{\text{ср}} = 0,3 \cdot 60^{-1}$  м/с. Область, ограниченная прямыми 1 и 2 (линейная аппроксимация), представляет собой область вероятных величин смещения теплового центра  $\Delta R$ . Она построена для интервала температур поверхности отливки  $T_{1\text{п}} = 800-1100$  °C в зависимости от температуры расплава  $T_{\text{зал}} = 1230-1320$  °C.

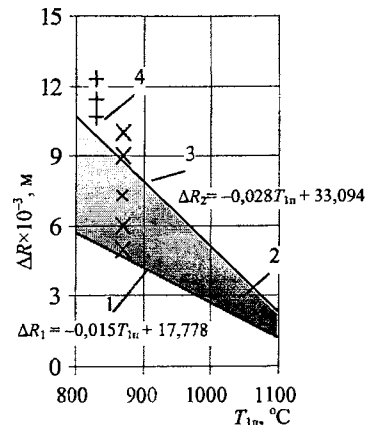


Рис. 2. Кинетика смещения теплового центра: 1 –  $T_{\text{зал}} = 1230$  °C; 2 –  $T_{\text{зал}} = 1320$  °C; 3 – выливание  $T_{1\text{п}} = 870$  °C; 4 – по Р. Томсону  $T_{1\text{п}} = 830$  °C

При выводе расчетной формулы (4) исходили из условия бесконечно большой интенсивности теплообмена между отливкой и окру-

жающей средой ( $Bi \gg 1$ ), имеющей место в зоне вторичного охлаждения. Сложности, возникающие при использовании формулы, заключаются в определении температуры поверхности  $T_{1п}$ , которая изменяется по длине отливки и зависит от ее диаметра. Поэтому расчет кинетики смещения теплового центра осуществили, задаваясь возможными значениями  $T_{1п}$  как в кристаллизаторе, так и на выходе из него, что позволило провести сравнение расчетных значений величины смещения теплового центра  $\Delta R$  с экспериментальными, полученными в результате выливания жидкого остатка. Толщина корки отливки  $\xi_{\text{эксп}}$  (степенная аппроксимация) и смещение теплового центра  $\Delta R$  (линейная аппроксимация) после выливания жидкого остатка в зависимости от времени формирования отливки  $t$  за пределами кристаллизатора представлены на рис. 3, 4. Интервал значений  $T_{1п}$  выбран из результатов экспериментального исследования из [9].

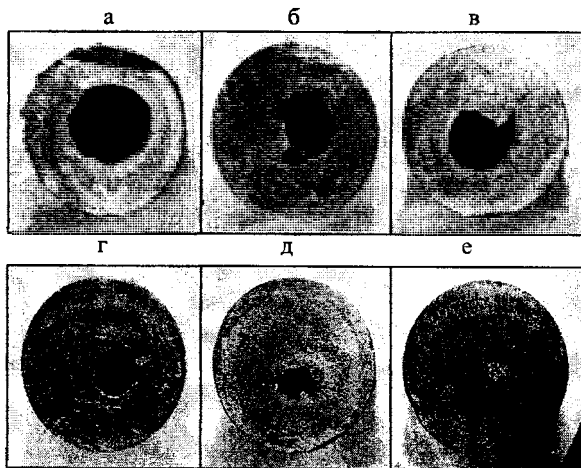


Рис. 3. Толщина корки отливки и смещение теплового центра за пределами кристаллизатора после выливания жидкого остатка: а –  $t = 80$  с;  $\xi_{\text{эксп}}^{\text{верх}} = 0,018$  м;  $\xi_{\text{эксп}}^{\text{низ}} = 0,030$  м;  $\Delta R = 0,006$  м; б – 112; 0,023; 0,033; 0,00; в – 118; 0,024; 0,043; 0,009; г – 130; 0,028; 0,046; 0,009; д – 140; 0,030; 0,050; 0,010; е –  $t = 152$  с;  $\xi_{\text{эксп}}^{\text{верх}} = 0,032$  м;  $\xi_{\text{эксп}}^{\text{низ}} = 0,050$  м;  $\Delta R = 0,009$  м;  $h_{\text{эксп}} = 0,760$  м

Установлено, что величина смещения теплового центра  $\Delta R$  в зависимости от температуры поверхности отливки изменяется в достаточно узких пределах: от  $(3-5) \cdot 10^{-3}$  м при  $T_{1п} = 1000$  °С до  $(6-11) \cdot 10^{-3}$  м при  $T_{1п} = 800$  °С

(рис. 3). Сравнение расчетных значений  $\Delta R$  с данными собственных экспериментальных исследований (точки 3, рис. 4), а также с данными Р. Томсона (точки 4, рис. 4) [9] показало хорошее совпадение результатов: по собственным данным  $\Delta R = (6-9) \cdot 10^{-3}$  м при  $T_{1п} = 870$  °С (линия 3, рис. 4), по Р. Томсону  $\Delta R = (10-12) \cdot 10^{-3}$  м при  $T_{1п} = 830$  °С.

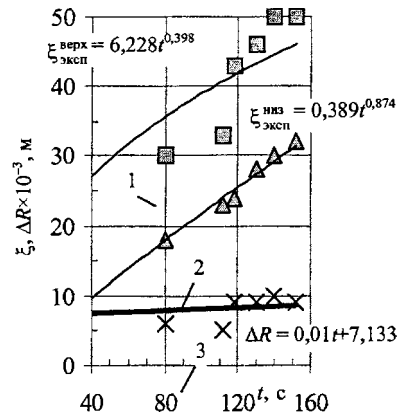


Рис. 4. Зависимость толщины корки и величины смещения теплового центра от времени формирования отливки за пределами кристаллизатора: 1 –  $\xi_{\text{эксп}}^{\text{верх}}$ ; 2 –  $\xi_{\text{эксп}}^{\text{низ}}$ ; 3 –  $\Delta R$

Уточненную глубину лунки для усредненной температуры поверхности отливки в кристаллизаторе  $T_{1п} = 1035$  °С определили как сумму  $h + 0,5\Delta H$ , что следует из геометрических построений (рис. 1). Тогда при расчете по формулам (2) и (3) имеем:

$$h + 0,5\Delta H = 0,693 + 0,5 \cdot 0,063 = 0,724 \text{ м}$$

при  $T_{\text{зал}} = 1230$  °С и

$$h + 0,5\Delta H = 0,693 + 0,5 \cdot 0,118 = 0,752 \text{ м}$$

при  $T_{\text{зал}} = 1320$  °С, что также весьма близко к экспериментальному значению (рис. 3е)

$$h_{\text{эксп}} = 0,760 \text{ м,}$$

полученному в результате выливания жидкого остатка. Некоторое превышение экспериментальных значений параметров  $\Delta R$  и  $h$  над расчетными объясняется условиями методики выливания.

Несмотря на достаточно низкий уровень значений величины смещения теплового центра, это явление приводит к ухудшению качества непрерывнолитых заготовок по сечению и длине. Уменьшить величину смещения можно двумя способами: во-первых, за счет снижения

перегрева расплава и, во-вторых, созданием одинаковых условий охлаждения в верхней и нижней зонах отливки за пределами кристаллизатора.

Однако при разработке технологии горизонтального литья следует учитывать, что снижение температуры заливаемого расплава может привести к переохлаждению поверхности хвостовика графитового вкладыша, образованию твердой корки на его торце и в конечном итоге – замерзанию входного отверстия кристаллизатора и остановке процесса литья. Дополнительное подстуживание нижней поверхности отливки, выходящей из кристаллизатора, где интенсивность теплоотвода велика, приведет к образованию отбела на наружной поверхности отливки, что также нежелательно ввиду ухудшению качества заготовок. При значительном различии интенсивности охлаждения тепловой центр отливки может сместиться относительно геометрического не вверх, а вниз [1].

#### ВЫВОД

Разработана математическая модель кинетики смещения теплового центра отливки относительно геометрического при горизонтальном непрерывном литье, которая дает возможность прогнозировать процесс формирования неоднородности структуры и свойств по периметру и длине горизонтальной отливки.

Установлено, что величина смещения теп-

лового центра зависит от температуры поверхности отливки. Расчетные значения величины смещения адекватны экспериментальным данным.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Соболев, В. В.** Особенности затвердевания непрерывных горизонтальных слитков / В. В. Соболев, И. А. Нестеров // Изв. АН СССР. Металлы. – 1982. – № 3. – С. 51–59.
2. **Соболев, В. В.** Тепловые режимы затвердевания стальных цилиндрических слитков при горизонтальном непрерывном литье / В. В. Соболев, П. М. Трефилов // Промышленная теплотехника. – 1988. – Т. 10, № 2. – С. 75–78.
3. **Исследование** кинетики смещения теплового центра при горизонтальной непрерывной разливке / Л. И. Белякова [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1979. – № 9. – С. 41–44.
4. **Шатагин, О. А.** Горизонтальное непрерывное литье цветных металлов и сплавов / О. А. Шатагин, В. Т. Сладкошteeв. – М.: Металлургия, 1974. – 176 с.
5. **Thomson, R.** Hydraulic modeling of closed-head continuous casting system / R. Thomson // British Foundryman. – 1976. – Vol. 69, № 3. – P. 62–70.
6. **Демченко, Е. Б.** Кинетика затвердевания отливки при горизонтальном непрерывном литье / Е. Б. Демченко // Литье и металлургия. – 2005. – № 3. – С. 28–32.
7. **Вейник, А. И.** Теория особых видов литья / А. И. Вейник. – М.: Машгиз, 1958. – 300 с.
8. **Roth, W.** Aluminum / W. Roth. – 1948. – № 7–8.
9. **Исследование**, разработка и внедрение в производство новой технологии горизонтального и вертикального непрерывного литья чугунных заготовок: отчет о НИР; рук. В. И. Тутов. – Минск, 1985. – 145 с. – № ГР 81032331.
10. **Thomson, R.** Notes of heat transfer and solidification rates in the continuous casting of cast iron / R. Thomson // British Foundryman. – 1977. – Vol. 10, № 1. – P. 1–7.

Поступила 13.01.2006