

О СМЕЩЕНИИ ТЕПЛОВОГО 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 ΔR , 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.

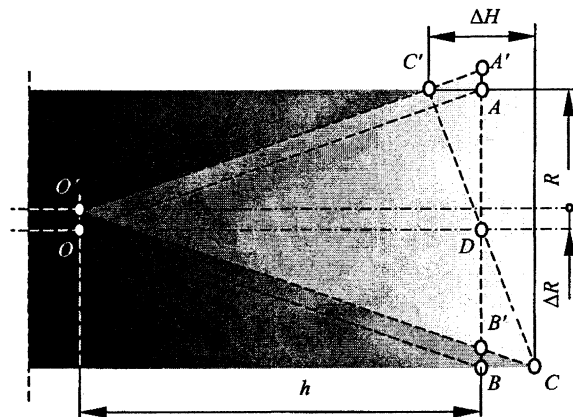


Рис. 1. Схема к расчету величины ΔR смещения теплового центра

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 ΔH [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 $A'C'A$ следует:

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

Отсюда

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

Величина запаздывания затвердевания ΔH 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; γ'_1 – удельный вес; c'_1 – теплоемкость жидкого расплава; $w_{\text{ср}}$ – средняя скорость литья; α – 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 γ_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; λ_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 ΔR

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

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 α 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 ΔR 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 ΔR сплошной чугунной отливки диаметром 0,100 м в зависимости от температуры поверхности отливки $\Delta R = f(T_{1\text{п}})$. Термодинамические 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/м³; $\gamma_1 = 7200$ кг/м³; $T_{\text{зал}} = 1320$ °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/м²; $w_{\text{ср}} = 0,3 \cdot 60^{-1}$ м/с. Область, ограниченная прямыми 1 и 2 (линейная аппроксимация), представляет собой область вероятных величин смещения теплового центра ΔR . Она построена для интервала температур поверхности отливки $T_{1\text{п}} = 800\text{--}1100$ °C в зависимости от температуры расплава $T_{\text{зал}} = 1230\text{--}1320$ °C.

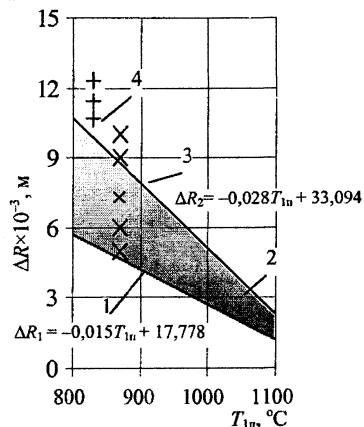


Рис. 2. Кинетика смещения теплового центра: 1 – $T_{\text{зал}} = 1230$ °C; 2 – $T_{\text{зал}} = 1320$ °C; 3 – выливание $T_{1\text{п}} = 870$ °C; 4 – по Р. Томсону $T_{1\text{п}} = 830$ °C

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 ΔR с экспериментальными, полученными в результате выливания жидкого остатка. Толщина корки отливки $\xi_{\text{эксп}}$ (степенная аппроксимация) и смещение теплового центра ΔR (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].

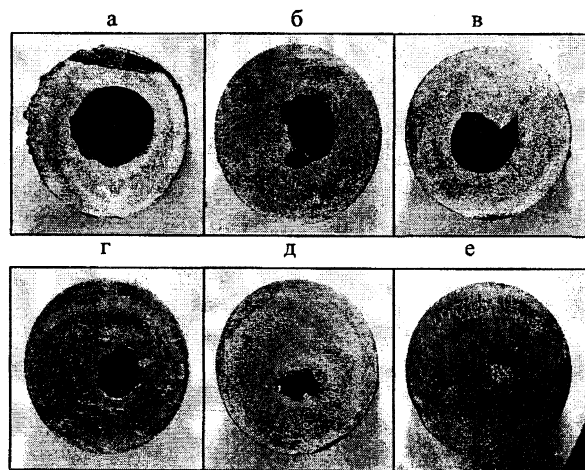


Рис. 3. Толщина корки отливки и смещение теплового центра за пределами кристаллизатора после выливания жидкого остатка: а – $t = 80$ с; $\xi_{\text{верх}}^{\text{эксп}} = 0,018$ м; $\xi_{\text{низ}}^{\text{эксп}} = 0,030$ м; $\Delta R = 0,006$ м; б – 112; 0,023; 0,033; 0,00; в – 118; 0,024; 0,043; 0,009;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

Установлено, что величина смещения теплового центра ΔR 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 ΔR 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.

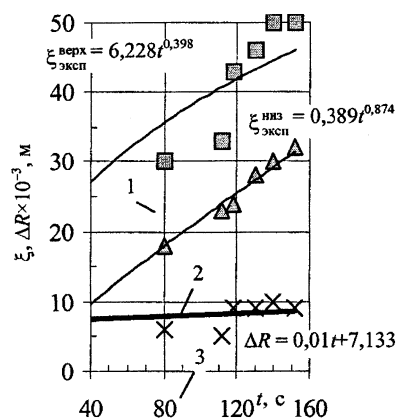


Рис. 4. Зависимость толщины корки и величины смещения теплового центра от времени формирования отливки за пределами кристаллизатора: 1 – $\xi_{\text{верх}}^{\text{эксп}}$; 2 – $\xi_{\text{низ}}^{\text{эксп}}$; 3 – ΔR

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 ΔR 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 – перемерзанию 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 чугуновых 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