

УДК 621.74.047

ФОРМИРОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОЙ ОТЛИВКИ ЗА ПРЕДЕЛАМИ КРИСТАЛЛИЗАТОРА

*Докт. техн. наук, проф. МАРУКОВИЧ Е. И.,
канд. техн. наук, доц. ДЕМЧЕНКО Е. Б.*

*Институт технологии металлов НАН Беларуси,
Белорусский национальный технический университет*

Известно, что на выходе из кристаллизатора происходит резкое изменение процесса формирования непрерывной отливки. Из зоны интенсивного охлаждения в кристаллизаторе ($\alpha = 500\text{--}1600 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$) отливка попадает в зону охлаждения на воздухе со значительно более низкой интенсивностью ($\alpha = 270\text{--}400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$) [1].

В результате резкого роста термического сопротивления теплоотдаче на поверхности отливки при неизменном термическом сопротивлении корки значительно уменьшается теплоотдача в окружающую среду. Отливка аккумулирует теплоту, что приводит к перераспределению температуры в корке отливки при сохранении температуры внутренней поверхности корки постоянной и равной температуре кристаллизации. Температура наружной поверхности отливки начинает быстро повышаться. По мере повышения температуры поверхности увеличивается температурный напор, а следовательно, и тепловой поток с поверхности отливки в окружающую среду. При этом температурный напор и тепловой поток через затвердевшую корку отливки уменьшаются. После достижения стационарного теплового равновесия, т. е. равенства тепловых потоков, рост температуры поверхности прекращается, начинается ее понижение за счет постепенного нарастания толщины затвердевшей корки.

Установлено, что изменение температуры поверхности отливки T_{1n} при охлаждении в естественных условиях практически не зависит от геометрических размеров, а полностью определяется толщиной затвердевшей корки [1, 2].

Обычно при непрерывном литье чугуна из кристаллизатора извлекается отливка, имеющая жидкую сердцевину и корку толщиной $\xi = 0,005\text{--}0,025 \text{ м}$. Температура поверхности отливки после разогрева составляет $T_{1n, \text{max}} = 1000\text{--}1100 \text{ }^\circ\text{C}$, а к моменту полного затвердевания снижается до $T_{1n, \text{max}} = 800\text{--}900 \text{ }^\circ\text{C}$.

Разогрев корки отливки после выхода из кристаллизатора не происходит мгновенно (рис. 1). Для достижения максимальной температуры поверхности отливки $T_{1n, \text{max}}$ требуется определенное время разогрева $t_{\text{раз}}$. Зная время и среднюю скорость литья $w_{\text{ср}}$, можно рассчитать расстояние $l_{\text{раз}}$ от торца кристаллизатора до наиболее горячего и соответственно наиболее опасного сечения отливки, где возникают прорывы расплава. Расчет затруднен тем, что наряду с разогревом наружных слоев отливки происходит ее дальнейшее затвердевание. Однако, учитывая, что рост температуры поверхности происходит на весьма ограниченном участке длиной всего $l_{\text{раз}} = 0,04\text{--}0,10 \text{ м}$, расчет кинетики разогрева и затвердевания отливки можно производить отдельно, без существенного снижения точности результатов.

Максимальную температуру поверхности отливки $T_{1n, \text{max}}$ определили из условия стационарного теплового баланса при равенстве удельных тепловых потоков, отводимых через корку q_k и с поверхности цилиндрической отливки в окружающую среду q_c

$$q_k = q_c$$

или

$$\frac{\lambda_1}{\xi} (T_{кр} - T_{1л.мах}) = \alpha (T_{1л.мах} - T_c), \quad (1)$$

где λ_1 – коэффициент теплопроводности материала отливки; $T_{кр}$ – температура кристаллизации расплава; T_c – то же окружающей среды.

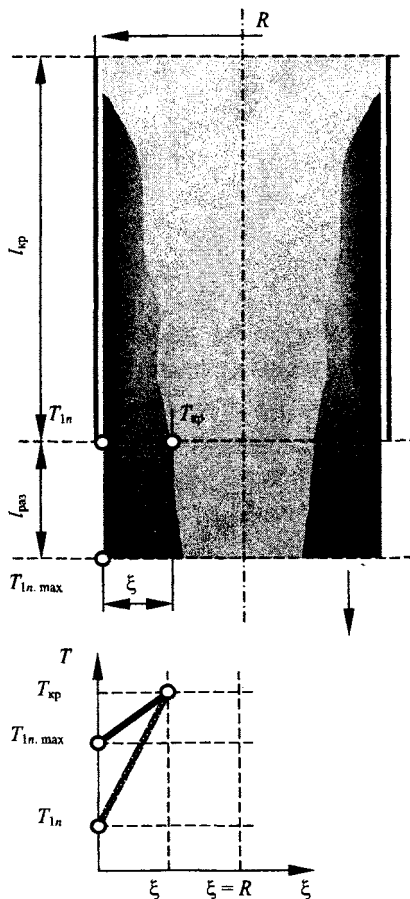


Рис. 1. Схема к расчету разогрева отливки за пределами кристаллизатора

Коэффициент теплоотдачи α представляет собой сумму

$$\alpha = \alpha_n + \alpha_k,$$

где α_n и α_k – коэффициенты теплоотдачи лучеиспусканием и конвекцией [3],

$$\alpha_n = \frac{C \left[\left(\frac{T_{1л.мах} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c + 273}{100} \right)^4 \right]}{T_{1л.мах} - T_c}, \quad (2)$$

$$\alpha_k = 0,468 \sqrt{Gr}. \quad (3)$$

Критерий Грасгофа рассчитали по формуле

$$Gr = \frac{gd^3 (T_{1л.мах} - T_c)}{v^2 T_{гр}},$$

где d – диаметр отливки; $T_{гр}$ – температура граничной зоны «отливка – окружающая среда»,

$$T_{гр} = \frac{T_{1л.мах} - T_c}{2}.$$

Окончательно имеем

$$Gr = \frac{2gd^3}{v^2}. \quad (4)$$

После подстановок (2)–(4) в (1) получили уравнение для расчета максимальной температуры поверхности отливки $T_{1л.мах}$

$$C \left[\left(\frac{T_{1л.мах} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c + 273}{100} \right)^4 \right] + 0,468 \sqrt{Gr} (T_{1л.мах} - T_c) = \frac{\lambda_1}{\xi} (T_{кр} - T_{1л.мах}). \quad (5)$$

Уравнение (5) решить относительно максимальной температуры разогрева $T_{1л.мах}$ невозможно, поэтому $T_{1л.мах}$ необходимо рассчитывать методом последовательных приближений.

Для расчета времени разогрева цилиндрической отливки $t_{раз}$ на выходе из кристаллизатора до максимальной температуры $T_{1л.мах}$ составили уравнение теплового баланса

$$Q_{тепл} = Q_{ак} + Q_{охл} + Q_{пер}. \quad (6)$$

Количество теплоты, переданное теплопроводностью $Q_{тепл}$ через цилиндрическую стенку за время разогрева, определили по формуле

$$Q_{тепл} = 2\pi R t_{раз} l_{раз} \frac{\lambda_1}{R \ln \frac{R}{R-\xi}} (T_{кр} - T_{1л}) = 2\pi t_{раз} l_{раз} \frac{\lambda_1}{R \ln \frac{R}{R-\xi}} (T_{кр} - T_{1л}), \quad (7)$$

где $t_{раз}$ – время разогрева корки отливки; $T_{1л}$ – температура поверхности отливки на выходе из кристаллизатора.

Количество аккумулированной отливкой теплоты $Q_{ак}$ рассчитали следующим образом:

$$Q_{ак} = \pi \xi (2R - \xi) l_{раз} \gamma_1 c_1 \frac{T_{1n,max} - T_{1n}}{2}, \quad (8)$$

где c_1 – удельная теплоемкость материала отливки.

Количество теплоты, отданное отливкой в окружающую среду $Q_{охл}$, нашли, принимая среднюю температуру корки на участке разогрева, равной

$$T_{ср,max} = \frac{T_{1n,max} + T_{1n}}{2}.$$

Тогда

$$Q_{охл} = \pi R l_{раз} t_{раз} \alpha (T_{1n,max} + T_{1n}), \quad (9)$$

где α – максимальный коэффициент теплоотдачи на участке разогрева.

Следует отметить, что существующие зависимости для расчета разогрева отливки за пределами кристаллизатора [1, 2, 4] не учитывают теплоту перегрева расплава $Q_{пер}$. Однако ее учет необходим, поскольку бесспорным является тот факт, что из кристаллизатора извлекается отливка, имеющая жидкую сердцевину и только часть теплоты перегрева расплава отводится в процессе формирования отливки в кристаллизаторе [4]. Легко подсчитать, что даже при минимальном перегреве в 80 °С для чугуновой отливки диаметром $d = 100$ мм и толщине корки $\xi = 9$ мм количество теплоты перегрева составит $Q_{пер} = 53$ кДж при $Q_{ак} = 121$ кДж и $Q_{охл} = 1,5$ кДж.

Количество теплоты перегрева $Q_{пер}$ определили по формуле

$$Q_{пер} = V_m \gamma_1 c_1' (T_{пер} - T_{кр}) = \pi \xi (2R - \xi) l_{раз} \gamma_1 c_1' (T_{пер} - T_{кр}), \quad (10)$$

где V_m – объем затвердевшего расплава; $T_{пер}$ – температура перегрева расплава; c_1' – удельная теплоемкость расплава.

После преобразований и решения уравнения (6) относительно $t_{раз}$ окончательно получили выражение

$$t_{раз} = \frac{\frac{1}{2} \xi (2R - \xi) \gamma_1 [c_1 \Theta_{1n,max} + c_1' \Theta_{пер}]}{2 \frac{\lambda_1}{R} \Theta_{кр} - \alpha R \ln \frac{R}{R - \xi}}, \quad (11)$$

$$\text{где } \Theta_{1n,max} = \frac{T_{1n,max} - T_{1n}}{T_{1n,max} + T_{1n}}; \quad \Theta_{пер} = \frac{T_{пер} - T_{кр}}{T_{1n,max} + T_{1n}};$$

$$\Theta_{кр} = \frac{T_{кр} - T_{1n}}{T_{1n,max} + T_{1n}} \text{ – температурные критерии.}$$

Зная время разогрева отливки $t_{раз}$, а также среднюю скорость вытяжки $w_{ср}$, можно определить длину участка разогрева

$$l_{раз} = w_{ср} t_{раз}. \quad (12)$$

Расчеты провели на примере вертикального непрерывного литья заготовок различного диаметра из чугуна СЧ20 (табл. 1).

Таблица 1

Технологические параметры литья

Параметр	Диаметр отливки d , м			
	0,050	0,100	0,140	0,200
Средняя скорость литья $w_{ср} \times 60^{-1}$, м/с	0,65	0,56	0,43	0,30
Толщина корки $\xi \times 10^{-3}$, м	5,9	7,1	8,1	11,0
Время формирования отливки в кристаллизаторе t , с	18,5	20,0	27,9	40,0

Термофизические коэффициенты выбраны из [5–7]: $C = 5,58$ Вт/(м²·К⁴); $\nu = 1,33 \times 10^{-6}$ м²/с; $\gamma_1 = 7200$ кг/м³; $\lambda_1 = 35$ Вт/(м·К); $c_1 = 753,6$ Дж/(кг·К); $c_1' = 837,4$ Дж/(кг·К); $T_{пер} = 1220$ °С; $T_{кр} = 1140$ °С; $T_c = 20$ °С. Изменение толщины корки отливки в течение времени ее разогрева не учитывали.

Результаты расчета представлены на рис. 2. Установлено, что при увеличении толщины корки максимальная температура поверхности отливки уменьшается при одновременном увеличении времени и длины участка разогрева, что объясняется снижением удельного теплового потока, отводимого через твердую корку отливки. Так, для отливки диаметром $d = 0,1$ м при скорости литья $w_{ср} = 0,56 \times 60^{-1}$ м/с и $\xi = 7,1 \times 10^{-3}$ м максимальная температура разогрева составила $T_{1n,max} = 1073$ °С (рис. 2а), вре-

мя разогрева $t_{раз} = 5,7$ с, а расстояние до опасного сечения $l_{раз} = 0,053$ м (рис. 2б). Произведя аналогичный расчет для отливки диаметром $d=0,2$ м при $w_{ср} = 0,30 \times 60^{-1}$ м/с и $\xi = 11,0 \times 10^{-3}$ м, получили значения: $T_{1л.мах} = 1013$ °С; $t_{раз} = 15,3$ с; $l_{раз} = 0,077$ м.

Длина участка разогрева мало зависит от времени разогрева. При увеличении времени разогрева $t_{раз}$ почти в три раза с 5,7 до 15,3 с длина участка разогрева $l_{раз}$ увеличивается незначительно – с 0,053 до 0,077 м (рис. 2б), что можно объяснить снижением средней скорости вытяжки отливки. Для отливок диаметром 0,05–0,15 м, имеющих толщину корки на выходе из кристаллизатора 0,006–0,008 м, максимальная температура $T_{1л.мах}$ достигается за весьма короткое время $t_{раз} < 10$ с, что говорит о скоротечности процесса разогрева корки отливки.

Сравнение с расчетами, проведенными по известным методикам [1, 2, 4], дало следующие результаты. Для отливки $d = 0,100$ м; $\xi = 0,009$ м и $w_{ср} = 0,5 \times 60^{-1}$ м/с по известной методике:

$T_{1л.мах} = 1030$ °С; $t_{раз} = 5,5$ с; $l_{раз} = 0,046$ м, а по разработанной методике: $T_{1л.мах} = 1045$ °С; $t_{раз} = 9,8$ с; $l_{раз} = 0,063$ м. Видно, что при практически одинаковых температурах $T_{1л.мах}$ время разогрева $t_{раз}$ и длина участка разогрева $l_{раз}$ более чем в 1,5 раза больше, чем по известной методике.

ВЫВОД

Для определенных групп заготовок можно говорить о существовании некоторой постоянной зоны разогрева поверхности отливки до максимальной температуры, расположенной на незначительном расстоянии от торца кристаллизатора. Этот факт является весьма важным при проектировании и определении местоположения систем вторичного охлаждения. Отрицательным является то обстоятельство, что при уменьшении толщины корки возрастает температура разогрева, что нежелательно из-за резкого снижения прочности корки.

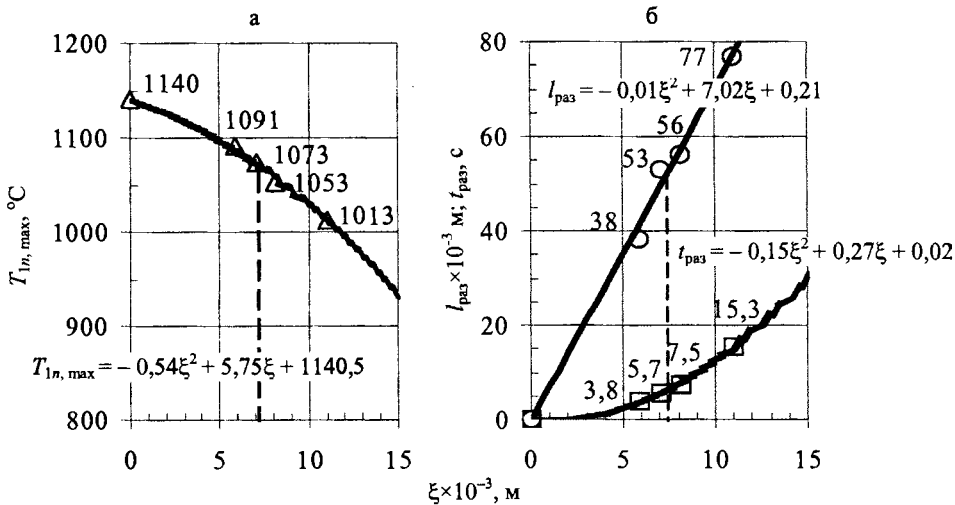


Рис. 2. Зависимости максимальной температуры разогрева: $T_{1л.мах}$ (а), времени $t_{раз}$ и длины участка разогрева $l_{раз}$ (б) от толщины корки отливки ξ

ЛИТЕРАТУРА

1. Расчет кинетики разогрева отливки за пределами кристаллизатора / Е. Б. Демченко [и др.] // *Металлургия*. – Минск: Вышэйш. шк., 1985. – Вып. 19. – С. 50–52.
2. Тутов, В. И. Расчет разогрева сплава при непрерывном литье / В. И. Тутов, А. А. Оффенгенден, В. А. Гринберг // *Металлургия*. – Минск: Вышэйш. шк., 1977. – Вып. 11. – С. 54–57.
3. Вейник, А. И. Расчет отливки / А. И. Вейник. – М.: Машгиз, 1964. – 395 с.

4. Технологические особенности процесса полунепрерывного литья / В. И. Тутов [и др.] // *Металлургия и литейное производство*. – Минск: Беларуская навука, 1998. – С. 148–151.
5. Непрерывное литье чугуна / О. А. Баранов [и др.]. – М.: *Металлургия*, 1968. – 335 с.
6. Вейник, А. И. Теория затвердевания отливки / А. И. Вейник. – М.: Машгиз, 1960. – 436 с.
7. Казанцев, Е. И. Промышленные печи / Е. И. Казанцев. – М.: *Металлургия*, 1975. – 367 с.

Поступила 12.12.2007