



It is offered to take into account irregular character of the heat of superheat allocation in liquid cup of casting by criterion of nonuniformity of the heat of superheat discharge along perimeter of the solidification front.

Е. Б. ДЕМЧЕНКО, БНТУ,
Е. И. МАРУКОВИЧ, Институт технологии металлов НАН Беларуси

УДК 621.74.047

К ВОПРОСУ УЧЕТА НЕРАВНОМЕРНОСТИ ОТВОДА ТЕПЛОТЫ ПЕРЕГРЕВА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ

Известно, что непрерывное литье характеризуется весьма жесткими условиями формирования отливки. Эти условия определяются прежде всего двумя факторами [1].

Первый фактор – это усадка отливки, естественный процесс, протекающий при ее формировании и последующем охлаждении. В результате усадки уменьшаются размеры отливки, между отливкой и кристаллизатором образуется газовый зазор, что в свою очередь приводит к снижению интенсивности теплоотвода, разогреву корки и замедлению скорости ее кристаллизации.

Второй, не менее значительный фактор – это термоконвективные потоки расплава, возникающие в жидкой лунке отливки в результате поступления перегретого расплава в кристаллизатор в процессе литья. Термоконвективные потоки омывают корку отливки у фронта затвердевания и также снижают скорость кристаллизации. Скорость кристаллизации корки тем ниже, чем выше скорость и температура потоков расплава.

Влияние усадки и термоконвективных потоков на процесс формирования отливки во многом определяется характером отвода теплоты перегрева расплава по периметру фронта затвердевания.

В случае вертикального литья полых цилиндрических заготовок при несимметричном по отношению к оси слитка подводе расплава имеет место неравномерный отвод теплоты перегрева относительно фронта затвердевания [2]. Скорость кристаллизации корки и величина газового зазора между коркой и поверхностью кристаллизатора зависят от неравномерного распределения температуры перегрева: там, где температура выше, корка тоньше, а зазор меньше, где ниже – корка толще, а зазор больше. Следовательно, по периметру отливки возникают разные по величине силы усадки, приводящие к нестабильному состоянию газового зазора, образованию разнотолщинности и овальности поверхности отливки.

При горизонтальном литье неравномерный отвод теплоты перегрева приводит к снижению скорости кристаллизации корки в верхней зоне кристаллизатора по отношению к нижней зоне. В результате усадки отливка за счет сил тяжести прижимается к нижней зоне кристаллизатора, образуя в верхней зоне газовый зазор. Как следствие, при литье имеют место запаздывание затвердевания в верхней зоне, а также смещение теплового центра отливки вверх относительно геометрического [3]. Поэтому возникает опасность прорывов корки в зоне выхода отливки из кристаллизатора, из-за чего скорость вытяжки уменьшаются, а это, в свою очередь, снижает производительность процесса литья.

Теоретические и экспериментальные исследования влияния теплоты перегрева расплава на характер фронта затвердевания отливки при непрерывном литье с открытым и закрытым уровнем показали, что действие термоконвективных потоков в значительной степени можно снизить, используя разделительные устройства [4]. Однако изменить неравномерный характер усадки отливки или снизить ее влияние на процесс формирования отливки весьма сложно. В таких случаях необходимо учитывать неравномерность отвода теплоты перегрева расплава в математических моделях кинетики затвердевания отливки.

В работе [5] исследована математическая модель расчета кинетики затвердевания полой цилиндрической отливки при вертикальном непрерывном литье с открытым уровнем:

$$\frac{d\delta}{dFo} = \frac{S}{2 \frac{\gamma_1}{\gamma_1} L_1^{\varphi} \left[1 - \frac{\delta(2-\delta)}{1-\delta_c^2} \right] (1-\delta) + L_0(1-\delta) + \frac{S\delta}{n(n+1)} \left(2 - \frac{3}{n+2} \delta \right)}, \quad (1)$$

где $\delta = \frac{\xi}{R}$ – приведенный размер корки отливки; $\delta_c = \frac{R_c}{R}$ – приведенный размер отливки; $Fo = \frac{a_1 t}{R^2}$

– критерий Фурье; $a_1 = \frac{\lambda_1}{c_1 \gamma_1}$ – коэффициент температуропроводности материала отливки;

$S = \frac{qR}{\lambda_1(T_{кр} - T_c)}$ – критерий интенсивности теплоотвода; $L_0 = \frac{r_{\text{эф}}}{c_1(T_{кр} - T_c)}$ – относительная теплота

затвердевания; $L_1^\varphi = \frac{r_{\text{пер}}^\varphi}{c_1(T_{кр} - T_c)}$ – относительная теплота перегрева.

Неравномерный отвод теплоты перегрева, обусловленный несимметричным подводом расплава в кристаллизатор (рис. 1), учитывали с помощью соотношений

$$r_{\text{пер}}^\varphi = z_1^\varphi (1-x) c_1 (T_{\text{зал}} - T_{\text{кр}}), \quad (2)$$

$$z_1^\varphi = \begin{cases} \frac{\cos \varphi - \cos \Omega}{1 - \cos \Omega} & 0 \leq \varphi \leq \Omega, \\ 0 & \Omega < \varphi < \pi, \end{cases} \quad (3)$$

где $r_{\text{пер}}^\varphi$ – удельная теплота перегрева расплава; z_1^φ – критерий неравномерности отвода теплоты перегрева по периметру фронта затвердевания; x – безразмерный коэффициент, определяющий долю отведенной теплоты перегрева песчаным стержнем; $T_{\text{зал}}$ – температура заливаемого расплава.

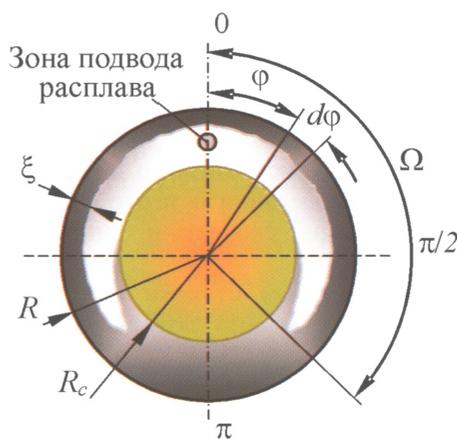


Рис. 1. Схема расчета вертикальной отливки

Здесь угловая координата Ω определяет область отвода теплоты перегрева, ограниченную участком периметра отливки, или фактическое положение фронта затвердевания находится экспериментальным путем. Текущая угловая координата φ области отвода теплоты перегрева, отсчитываемая от места подвода расплава в кристаллизатор, показывает, как изменяется количество отведенной теплоты перегрева в разных зонах фронта затвердевания по периметру отливки. Очевидно, что максимальное количество теплоты перегрева будет отведено в зоне подвода расплава $\varphi=0$, а минимальное – в зоне $\varphi=\Omega$ (учитывая симметрию для половины отливки). На участке периметра отливки $0 \leq \varphi \leq \Omega$ при $\varphi \rightarrow \Omega$ количество отведенной теплоты перегрева будет стремиться к нулю $r_{\text{пер}}^\varphi \rightarrow 0$.

При выводе формулы (1) принято, что при фиксированных значениях времени формирования отливки в кристаллизаторе t значения удельного теплового потока q одинаковы по периметру наружной поверхности отливки, т.е. не зависят от угловой координаты φ . Однако в работе [6] показано, что с доверительной вероятностью 95% в зоне $\varphi=0$ справедлива зависимость

$$q = \frac{q_0}{1 + \beta t},$$

где $q_0 = a_0 + a_1 T_{\text{зал}} + a_2 w_b$ – начальный удельный тепловой поток на уровне мениска расплава; $\beta = b_0 + b_1 T_{\text{зал}} + b_2 w_b$ – коэффициент, характеризующий степень снижения теплового потока с увеличением времени t , учитывающие влияние технологических параметров процесса литья $T_{\text{зал}}$ и скорости течения охлаждающей воды w_b . Константы аппроксимации a_i, b_i ($i=0-2$) рассчитываются по результатам экспериментов.

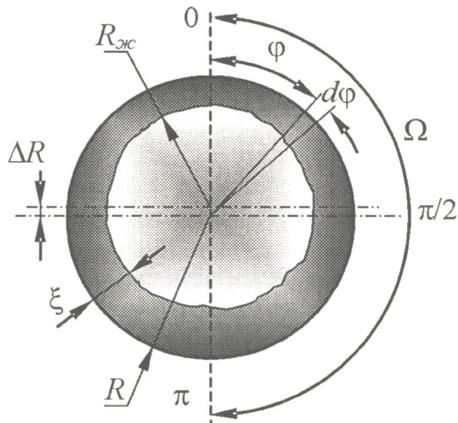
Поэтому в формулу (1) ввели безразмерные переменные

$$S = \frac{S_0}{1 + kFo}, \quad S_0 = \frac{q_0 R}{\lambda_1 (T_{\text{кр}} - T_{\text{cp}})}, \quad k = \frac{\beta R^2}{a_1}.$$

Последующие расчеты и их сравнение с экспериментальными результатами показали, что такой подход к учету неравномерности отвода теплоты перегрева и ее влияния на процесс формирования отливки оказался правильным [2].

Математическую модель (1)–(3) можно использовать для расчета кинетики затвердевания отливки при горизонтальном непрерывном литье, если раскрыть физический смысл критерия неравномерности отвода теплоты перегрева z^φ (см. выражение (3)).

Как и в случае вертикального литья с открытым уровнем, при горизонтальном литье цилиндрических заготовок теплота перегрева, вносимая жидким расплавом в кристаллизатор в процессе циклической вытяжки, неравномерно отводится по периметру фронта затвердевания (рис. 2). Однако здесь фронт затвердевания располагается вдоль всего периметра отливки. Поэтому угловая координата области отвода теплоты перегрева примет значение $\Omega = \pi$ (учитывая симметрию для половины отливки), а количество отведенной теплоты перегрева в разных зонах области отвода Ω определится условием $0 \leq \varphi < \pi$.



Тогда выражения (2) и (3) примут вид ($x=0$)

$$r_{\text{пер}}^\varphi = z_2^\varphi c_1' (T_{\text{зал}} - T_{\text{кр}}),$$

$$z_2^\varphi = \begin{cases} \frac{\cos \varphi + 1}{2} & 0 \leq \varphi < \pi, \\ 0 & \varphi = \pi. \end{cases}$$

Максимальное количество теплоты перегрева будет отведено в зоне подвода расплава $\varphi=0$. На участке периметра отливки $0 \leq \varphi \leq \pi$ при $\varphi \rightarrow \pi$ количество отводимой теплоты перегрева будет также стремиться к нулю $r_{\text{пер}}^\varphi \rightarrow 0$.

Более полную картину процесса формирования горизонтальной отливки можно получить, если выполнить расчет величины смещения теплового центра ΔR [3].

Рис. 2. Схема расчета горизонтальной отливки

Такой характер наблюдается при вертикальном литье с закрытым уровнем [7]. В этом случае условия формирования отливки будут такими: угловая координата области отвода теплоты перегрева примет значение $\Omega = \pi$ (учитывая симметрию для половины отливки), а текущая угловая координата будет находиться на грани вырождения ($\varphi=0$). Это означает, что количество отведенной теплоты перегрева в любой точке периметра фронта затвердевания отливки будет одинаковым $r_{\text{пер}}^\varphi = \text{const}$.

В процессе формирования непрерывной отливки может иметь место равномерный отвод теплоты перегрева по

периметру фронта затвердевания. Тогда математическая модель (1) может быть решена применительно к вертикальному литью с закрытым уровнем при условиях (2) и (3) ($x=0$)

$$r_{\text{пер}}^\varphi = z_3^\varphi c_1' (T_{\text{зал}} - T_{\text{кр}}),$$

$$z_3^\varphi = 1 \quad \begin{cases} \varphi = 0, \\ \Omega = \pi. \end{cases}$$

Выводы

Предложено учитывать неравномерный характер отвода теплоты перегрева по периметру фронта затвердевания непрерывной отливки критерием неравномерности отвода теплоты перегрева z^φ .

Показана возможность применения критерия неравномерности z^φ в математических моделях расчета кинетики затвердевания отливки при вертикальном и горизонтальном непрерывном литье сплошных и полых цилиндрических заготовок.

Литература

1. Неравномерность фронта затвердевания непрерывных слитков / В.А. Ульянов, Е.М. Китаев, А.А. Скворцов // Изв. вузов. Черная металлургия. 1978. №11. С. 34–38.
2. Марукович Е.И., Демченко Е.Б., Офенгенден А.А. Учет влияния теплоты перегрева расплава на формирование заготовки при вертикальном непрерывном литье // Металлургия машиностроения. 2006. №2. С. 7–11.
3. Демченко Е.Б., Марукович Е.И. О смещении теплового центра при горизонтальном непрерывном литье // Вестн. БНТУ. 2006. №3. С. 47–50.
4. Влияние термоконвекции на стабильность горизонтального непрерывного литья / В.И. Тутов, В.А. Гринберг, М.В. Жельнис, Е.Б. Демченко // Литейное производство. 1987. №1. С. 21–22.
5. Демченко Е.Б., Офенгенден А.А., Марукович Е.И. Затвердевание непрерывной отливки при неравномерном распределении теплоты перегрева // Литейщик России. №3. 2006. С. 17–21.
6. Исследование процесса теплопередачи при вертикальном полунепрерывном литье чугуна / Е.Б. Демченко, А.А. Офенгенден // Металлургия. Мн.: Выш. шк., 2004. Вып. 28. С. 81–86.
7. Марукович Е.И., Демченко Е.Б. Кинетика затвердевания отливки при вертикальном непрерывном литье с закрытым уровнем // Литье и металлургия. 2006. №1. С. 64–68.