

2. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.
3. Luis D., Sawage G. Теория теплопередачи и образования воздушного зазора в кристаллизаторах непрерывного литья // Airons instituts. 1962. Вып. 200. № 1. С. 41 – 47.
4. Акименко А.Д. К вопросу об изменении теплового потока по длине кристаллизатора // Изв. вузов. Черная металлургия. 1967. № 2. С. 45 – 48.
5. Касандрова О.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений. М.: Наука, 1970. 104 с.
6. Хартман К., Лецкий Э., Шеффер В. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. М.: Мир, 1977. 552 с.

УДК 621.74.047.

Е.Б. ДЕМЧЕНКО, канд. техн. наук, **В.И. ТУТОВ**, д-р техн. наук,
В.А. ГРИНБЕРГ, канд. техн. наук (БНТУ)

РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ПОЛОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОТЛИВКИ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ НЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ

При математическом моделировании процесса затвердевания отливки необходимо определить коэффициент теплоотдачи от жидкого металла к твердой корке $\alpha_{\text{ж}}$ [1, 2]. В общем виде, с учетом гидродинамики расплава, теплового баланса жидкой фазы и нелинейности граничных условий, такая задача может быть решена только численными методами с помощью критериальных уравнений и полученных в результате моделирования данных по скоростям перемещения расплава у фронта затвердевания. При конкретизации поставленной задачи определение $\alpha_{\text{ж}}$ не представляется возможным ввиду отсутствия достоверных сведений о характере теплообмена на границе расплав – твердая корка.

Не менее трудная задача решается при определении суммарного коэффициента теплопередачи от твердой корки к охлаждающей среде α [3]. Его определяют с учетом термических сопротивлений газовых зазоров, возникающих между различными элементами системы (например, между коркой и кристаллизатором) и изменяющихся в процессе литья в зависимости от параметров процесса, усадки отливки и других факторов. Все это снижает точность конечных результатов расчета.

Поэтому в математической модели расчета вместо значений коэффициентов теплопередачи целесообразнее использовать значения удельного теплового потока q , отводимого с поверхности отливки к охлаждающей среде и определяемого путем экспериментального исследования температурного режима рабочей втулки кристаллизатора (тем более, что q все равно необходимо определять для расчета α). Такие результаты более на-

дежны и стабильны, а их использование значительно упростит математическую модель.

При построении математической модели процесса затвердевания непрерывной отливки важную роль играет способ учета влияния теплоты перегрева $Q_{\text{пер}}$. Перегретый металл подплавляет затвердевающую корку, уменьшая скорость кристаллизации. Наиболее правильным был бы учет влияния перегрева при введении граничных условий третьего рода на границе расплав – твердая корка [4]. Однако такой подход требует учета передачи теплоты теплопроводностью и трансляцией вместе с массой металла, перемещающегося в результате конвективного движения, что усложняет решение задачи.

При исследовании механизмов формирования отливки, температурного поля жидкой лунки [5] было установлено, что теплота перегрева снимается практически по всей длине фронта затвердевания. Поэтому будем считать, что отвод теплоты перегрева осуществляется пропорционально удельному тепловому потоку, отведенному в различных зонах кристаллизатора. Тогда для i -й зоны кристаллизатора доля отведенной теплоты перегрева составит:

$$m_i = q_{i\text{cp}} \Delta l_i / (q_{\text{cp}} l),$$

где $q_{i\text{cp}}$ – средний в i -й зоне тепловой поток; Δl_i – протяженность i -й зоны; q_{cp} – средний тепловой поток в кристаллизаторе; l – длина кристаллизатора.

Среднее значение удельного теплового потока в кристаллизаторе будем определять по способу аддитивности из соотношения

$$q_{\text{cp}} = \left(\sum_{i=1}^n q_i \Delta l_i \right) / l,$$

а среднее значение теплового потока в i -й зоне – как среднее арифметическое значение потоков в начале q_i и конце q_{i+1} зоны:

$$q_{i\text{cp}} = (q_i + q_{i+1}) / 2.$$

В математической модели процесса формирования отливки необходимо выполнить некоторые упрощения, обычные при решении такого рода задач. Эти упрощения сводятся к нижеследующему.

1. Рассматривается только установившийся (квазистационарный) период процесса формирования отливки. Начальный и конечный периоды составляют незначительную часть времени всего процесса и аналитическому исследованию не подвергаются.

2. Термофизические коэффициенты в общем случае зависят от температуры. В расчетах принимаем их постоянными, средними в рассматриваемом интервале температур.

3. Затвердевание сплавов в интервале температур кристаллизации существенно усложняет решение задачи. Однако при соблюдении условия $\Delta T_{кр} / T_{кр} \ll 1$ решения, полученные для сплавов, затвердевающих с постоянной температурой кристаллизации $T_{кр}$, можно распространить на сплав, затвердевающий в интервале температур $\Delta T_{кр}$ [6]. Это условие верно для большинства технических сплавов, в том числе и для чугуна. Поэтому в расчетах температуру затвердевания принимаем величиной постоянной.

4. Для сплавов, затвердевающих с образованием эвтектики, за $T_{кр}$ можно принять температуру солидуса $T_{сол}$, а при образовании твердых растворов $T_{кр} = (T_{кр} + T_{сол})/2$.

5. Эффективная удельная теплота кристаллизации, учитывающая и аккумулированную теплоту, выделяемую при охлаждении сплава от $T_{лик}$ до $T_{сол}$, определяется из выражения [6]

$$r_{эф} = r + \frac{1}{2}(c + c')\Delta T_{кр},$$

где r – истинная удельная теплота кристаллизации; c – удельная теплоемкость твердого металла; c' – удельная теплоемкость жидкого металла.

6. Передача теплоты вдоль оси непрерывной отливки осуществляется как трансляцией, так и теплопроводностью. Однако роль теплопроводности при скоростях литья выше $(0,2...0,3) \cdot 60^{-1}$ м/с становится пренебрежимо малой. Поэтому при решении задачи количеством теплоты, переданной теплопроводностью вдоль оси отливки, можно пренебречь.

7. Распределение температуры по толщине затвердевшей корки условимся считать прямолинейным [6]:

$$T = -(T_{кр} + T_n)(y/\xi) + T_{кр},$$

где T_n – температура твердой корки в точке с текущей координатой y в пределах толщины затвердевшей корки ξ .

Рассмотрим процесс затвердевания полой цилиндрической отливки, внутренняя поверхность которой образована песчаным стержнем, при равномерном по периметру подводе металла в кристаллизатор.

Составим для участка длиной Δl_i , ограниченного сечениями i и $i + 1$ (рис. 1), уравнение теплового баланса системы жидкий металл – твердая корка – кристаллизатор. Количество теплоты, внесенной в единицу времени жидким металлом ($Q_{i ж}$) и твердой коркой ($Q_{i т}$) через сечение i , будет равно количеству теплоты, вынесенной через сечение $i + 1$ жидким металлом ($Q_{i+1 ж}$), твердой коркой ($Q_{i+1 т}$) и отведенной через кристаллизатор к охлаждающей среде ($Q_{i охл}$). Так как в кристаллизаторе отвод теплоты перегрева осуществляется от всего металла, прошедшего через кристаллизатор, условно исключим теплоту перегрева из теплосодержания

жидкого металла в сечениях i и $i + 1$, а отведенную теплоту перегрева на участке Δl_i учтем отдельным членом ($Q_{i \text{ пер}}$). Количеством теплоты, аккумулированной песчаным стержнем, пренебрегаем, поскольку стержень отводит очень незначительную часть теплоты перегрева по сравнению с теплотой, отведенной через кристаллизатор [5].

Уравнение теплового баланса запишется в виде

$$Q_{i \text{ ж}} + Q_{i \text{ т}} = Q_{i+1 \text{ ж}} + Q_{i+1 \text{ т}} + Q_{i \text{ охл}} + Q_{i \text{ пер}}. \quad (1)$$

Количество теплоты, внесенной жидким металлом через сечение i , определим так:

$$Q_{i \text{ ж}} = V_{i \text{ ж}} \rho (r_{\text{эф}} + cT_{\text{кр}}),$$

где ρ – плотность материала отливки.

Объемный расход жидкого металла $V_{i \text{ ж}}$ через сечение i

$$V_{i \text{ ж}} = F_{i \text{ ж}} w_{\text{ср}} = [\pi(R - \xi_i)^2 - r^2] w_{\text{ср}},$$

где $F_{i \text{ ж}}$ – площадь поперечного сечения жидкого металла в сечении i ; $w_{\text{ср}}$ – средняя скорость литья; R – радиус отливки; ξ_i – толщина затвердевшей корки в сечении i ; r – радиус стержня. Осуществив подстановку, получим

$$Q_{i \text{ ж}} = \pi w_{\text{ср}} \rho [(R - \xi_i)^2 - r^2] (r_{\text{эф}} + cT_{\text{кр}}). \quad (2)$$

Таким же образом находится количество теплоты, внесенной жидким металлом через сечение $i+1$:

$$Q_{i+1 \text{ ж}} = \pi w_{\text{ср}} \rho [(R - \xi_{i+1})^2 - r^2] (r_{\text{эф}} + cT_{\text{кр}}), \quad (3)$$

где ξ_{i+1} – толщина затвердевшей корки в сечении $i + 1$.

Количество теплоты, внесенной в единицу времени твердой коркой через сечение i ,

$$Q_{i \text{ т}} = V_{i \text{ т}} \rho c T_{i \text{ ср}},$$

где $T_{i \text{ ср}}$ – средняя температура затвердевшей корки в сечении i .

Объемный расход $V_{i \text{ т}}$ через сечение i определим так:

$$V_{i \text{ т}} = F_{i \text{ т}} w_{\text{ср}} = \pi [R^2 - (R - \xi_i)^2] w_{\text{ср}} = \pi \xi_i (2R - \xi_i) w_{\text{ср}},$$

где $F_{i \text{ т}}$ – площадь поперечного сечения затвердевшего металла в сечении i .

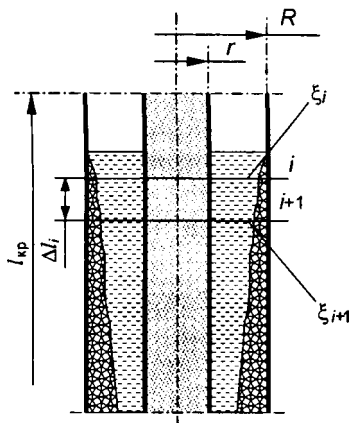


Рис. 1. Схема к расчету процесса затвердевания полый непрерывной отливки

Подставив $V_{i\tau}$ в формулу для $Q_{i\tau}$, получим

$$Q_{i\tau} = \pi w_{\text{ср}} \rho c (2R - \xi_i) \xi_i T_{i\text{ср}}. \quad (4)$$

Аналогично определим количество теплоты, внесенной затвердевшим металлом через сечение $i + 1$:

$$Q_{i+1\tau} = \pi w_{\text{ср}} \rho c (2R - \xi_{i+1}) \xi_{i+1} T_{i+1\text{ср}}, \quad (5)$$

где $T_{i+1\text{ср}}$ – средняя температура корки в сечении $i + 1$.

Количество теплоты, отведенной через кристаллизатор,

$$Q_{i\text{охл}} = q_{i\text{ср}} F_{\text{охл}}.$$

Площадь теплоотдающей поверхности отливки $F_{\text{охл}}$ на участке Δl_i определится по формуле

$$F_{\text{охл}} = 2\pi R w_{\text{ср}} \Delta l_i,$$

где Δl_i – время формирования твердой корки отливки на участке Δl_i . Осуществив подстановку, получим

$$Q_{i\text{охл}} = 2\pi R w_{\text{ср}} q_{i\text{ср}} \Delta l_i. \quad (6)$$

В выражении для теплоты перегрева, отводимой от поверхности фронта затвердевания, $Q_{i\text{пер}} = m_i V_{\text{ж}} \rho r_{\text{пер}}$ раскроем значение полного объемного расхода жидкого металла в кристаллизаторе:

$$V_{\text{ж}} = \pi(R^2 - r^2) w_{\text{ср}}$$

и будем иметь

$$Q_{i\text{пер}} = m_i \pi(R^2 - r^2) w_{\text{ср}} \rho r_{\text{пер}}, \quad (7)$$

где $r_{\text{пер}} = c'(T_{\text{зал}} - T_{\text{кр}})$ – удельная теплота перегрева жидкого металла; $T_{\text{зал}}$ – температура металла в кристаллизаторе.

Подставив выражения (2) – (7) в уравнение теплового баланса (1) и решив его относительно Δl_i получим

$$\Delta l_i = \frac{\rho r_{\text{эф}}}{2R q_{i\text{ср}}} \{ [\xi_{i+1}(2R - \xi_{i+1}) - \xi_i(2R - \xi_i)] + \rho c \xi_{i+1}(2R - \xi_{i+1})(T_{\text{кр}} - T_{i+1\text{ср}}) + \rho c \xi_i(2R - \xi_i)(T_{\text{кр}} - T_{i\text{ср}}) + m_i \rho r_{\text{пер}}(R^2 - r^2) \}. \quad (8)$$

Уравнение (8) содержит параметры $T_{i\text{cp}}$ и $T_{i+1\text{cp}}$, которые очень трудно определить экспериментально. Исключим их, воспользовавшись данными работы [6]:

$$T_{\text{кр}} - T_{\text{ср}} = \frac{1}{n+1} (T_{\text{кр}} - T_n) \frac{1 - \frac{1}{2} \delta}{1 - \frac{1}{2} \delta} \quad (9)$$

При $n = 1$ и учитывая, что $T_{\text{кр}} - T_n = q_i \xi_i / \lambda$, определяем $T_{i\text{cp}}$ и $T_{i+1\text{cp}}$, решая уравнение (9) для соответствующих сечений i и $i + 1$. После преобразования имеем:

$$T_{\text{кр}} - T_{i\text{cp}} = \frac{1}{3} \frac{q_i \xi_i}{\lambda} \frac{3R - \xi_i}{2R - \xi_i}; \quad (10)$$

$$T_{\text{кр}} - T_{i+1\text{cp}} = \frac{1}{3} \frac{q_{i+1} \xi_{i+1}}{\lambda} \frac{3R - \xi_{i+1}}{2R - \xi_{i+1}}. \quad (11)$$

Подставив выражения (10) и (11) в уравнение (8), получим окончательную формулу, описывающую кинетику затвердевания полой цилиндрической отливки:

$$\Delta t_i = \frac{\rho}{2Rq_{i\text{cp}}} \{ m_i r_{\text{пер}} (R^2 - r^2) + r_{\text{эф}} (2R - \xi_i - \xi_{i+1}) \times \\ \times (\xi_{i+1} - \xi_i) + \frac{1}{3} \frac{c}{\lambda} [q_{i+1} \xi_{i+1}^2 (3R - \xi_{i+1}) - q_i \xi_i^2 (3R - \xi_i)] \}. \quad (12)$$

По уравнению (12) определяется изменение толщины ξ корки отливки за время формирования Δt_i при перемещении отливки на расстояние Δl_i со скоростью $w_{\text{ср}}$. Она связывает между собой параметры процесса литья (l , $w_{\text{ср}}$, R , ξ), условия охлаждения (q_i , q_{i+1} , $q_{i\text{cp}}$) и термофизические характеристики материала отливки ($T_{\text{кр}}$, $r_{\text{эф}}$, $r_{\text{пер}}$, c , λ).

Уравнение (12) решали методом последовательных приближений. Алгоритм и программа расчета составлены на языке программирования Паскаль. Расчет выполнялся для полой цилиндрической отливки из чугуна СЧ20 диаметром 104 мм, толщиной стенки 20 мм при средней скорости литья $w_{\text{ср}} = 0,56 \cdot 60^{-1}$ м/с, температуре металла $T_{\text{зал}} = 1320$ °С и интенсивности охлаждения (скорость течения воды в канале рубашки охлаждения кристаллизатора) $w_{\text{в}} = 2,2; 3,0; 3,6$ м/с. Термофизические характеристики чугуна выбраны из работы [7]. Полное время затвердевания отливки в пределах кристаллизатора было разбито на пять отрезков: первый – от 0 до 2 с, второй – от 2 до 5, третий – от 5 до 10, четвертый – от 10 до 15, пятый – от 15 до 16,6 с. В соответствии с этим в расчет вводились значения удельных тепловых потоков (табл. 1).

Значения удельных тепловых потоков в кристаллизаторе

q_{2n} , МВт/м ²	Δt_n , с				
	2,0	3,0	5,0	5,0	1,6
	При $w_B = 2,2$ м/с				
q_i	2,70	2,30	1,75	1,24	1,11
q_{i+1}	2,30	1,75	1,24	1,11	1,09
	При $w_B = 3,0$ м/с				
q_i	2,79	2,34	1,82	1,28	1,18
q_{i+1}	2,34	1,82	1,28	1,18	1,16
	При $w_B = 3,6$ м/с				
q_i	2,87	2,42	1,86	1,32	1,24
q_{i+1}	2,42	1,86	1,32	1,24	1,22

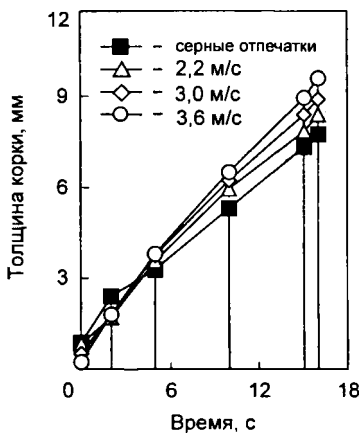


Рис. 2. Кинетика формирования корки отливки в сравнении с экспериментальными данными (серые отпечатки)

Результаты расчета кинетики затвердевания отливки (рис. 2) показали, что минимально допустимая толщина корки на выходе из кристаллизатора при высокой интенсивности охлаждения ($w_B = 3,6$ м/с) составляет $\xi_{расч} = 9,6$ мм. С уменьшением интенсивности охлаждения ($w_B = 2,2$ м/с) толщина корки уменьшается до $\xi_{расч} = 8,9$ мм. Согласно результатам экспериментов, полученных с помощью серых отпечатков [8], толщина твердой корки отливки на выходе из кристаллизатора составляет $\xi_{экс} = 7,9$ мм.

Математическая модель дает достаточно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных результатов и может быть использована в качестве базы для разработки математических моделей процесса кристаллизации полых и сплошных отливок при симметричном и несимметричном охлаждении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ефимов В.А., Ельдарханов А.С. Влияние контактного теплообмена и газового зора на процессы затвердевания непрерывных заготовок // Процессы литья. 1997. № 4. С. 89 – 95.
2. Охлаждение кристаллизаторов в условиях частичного кипения / А.Д. Акименко, С.А. Калинин, В.Е. Пермитин, А.Л. Голованов // Повышение качества отливок и слитков. Горький: Изд-во ГПИ им. А.А. Жданова, 1979. № 1. С. 42 – 45.

3. Теплопередача в зазорах кристаллизаторов МНЛЗ / А.Д. Акименко, Д.К. Григорьев, В.Е. Гирский, В.П. Перминов // Проблемы стального слитка: Мат-лы VI всесоюз. научн.-техн. конф. М., 1976. С. 352 – 355.

4. *Самойлович Ю.А., Ясницкий Л.Н., Кабаков З.К.* Математическое моделирование тепловых и гидродинамических явлений процесса затвердевания непрерывного слитка // Изв. АН СССР. Металлы. 1982. № 2. С. 62 – 68.

5. Исследование, разработка и внедрение в производство процессов непрерывного литья машиностроительных заготовок / Деп. рук.: отчет о НИР, г.р. № 0182.9031552. Мн., 1985, 111 с.

6. *Вейник А.И.* Теория затвердевания отливки. М.: Машгиз, 1960. 435 с.

7. *Баландин Г.Ф.* Основы теории формирования отливок. М.: Машиностроение, 1976. 328 с.

8. Особенности технологии вертикального непрерывного литья заготовок / В.А. Гринберг, Е.Б. Демченко, Г.И. Столярова и др. // Усовершенствование технологии горизонтального непрерывного литья. Каунас: Пяргалс. 1989. С. 18 – 20.

УДК 621.074

**И.В. ЗЕМСКОВ, канд. тех. наук,
Г.И. СТОЛЯРОВА, И.К. ФИЛАНОВИЧ,
К.В. КОРОЛЕВ (БНТУ)**

ТИПОРАЗМЕРНЫЙ РЯД УСТАНОВОК ВЕРТИКАЛЬНОГО НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК МАШИНОСТРОЕНИЯ

В настоящее время в металлургии расширяется область применения вертикальной непрерывной разливки металла в слитки, что обусловлено освоением процесса непрерывного литья в литейном производстве при получении отливок разного назначения из черных и цветных сплавов.

Параллельно разработке технологии, учитывающей специфические и конструктивные особенности отливок определенного назначения и род сплава, производится разработка и освоение соответствующих конструкций установок.

Предложены принципиальные технологические схемы непрерывного литья заготовок: сплошного и полого сечения (полюе отливки с использованием разовых стержней); круглого, прямоугольного и фасонного поперечного сечения; мерных (с разделением в процессе литья на штучные заготовки определенной длины) и длинномерных (с последующей разрезкой полученной отливки) различных габаритов, массы и сплава.

На основании многолетних исследований и опыта внедрения в производство Белорусским национальным техническим университетом в научно-исследовательской лаборатории прогрессивных технологических процессов производства отливок из черных и цветных сплавов разработана гамма установок для вертикальной непрерывной разливки металлов в условиях