

Студент гр. 104317 Кузьмич В.Н.  
 Научный руководитель – Крутилин А.Н.  
 Белорусский национальный технический университет  
 г.Минск

Изучение тепловых и гидродинамических процессов при непрерывном литье и построение адекватной математической модели осложняется изменением тепловых характеристик в системе "затвердевающая отливка - кристаллизатор". Связано это, главным образом, с изменением коэффициента теплопередачи, знание которого необходимо для расчета кинетики затвердевания, температурных полей, выбора оптимальных режимов литья.

Из общей теории теплообмена известно, что в системах со сложным видом переноса тепла, а именно к этому случаю относится теплообмен в кристаллизаторе, коэффициент теплопередачи определяется из следующих выражений:

$$k = \frac{q}{\Delta t} \quad (1)$$

и

$$k = \frac{1}{\sum_{i=1}^N R_i} \quad (2)$$

где  $k$  - общий коэффициент теплопередачи;  $q$  - величина удельного теплового потока, проходящего через систему;  $\Delta t$  - разность температур на границах системы;  $R_i$  - термическое сопротивление  $i$ -го элемента системы;  $N$  - число элементов.

Чтобы воспользоваться (1) и (2) для определения коэффициента  $k$ , в кристаллизаторе необходимо знать величины теплового потока,  $q$ ; разность температур на границах системы,  $\Delta t$ , в каждый фиксированный момент времени; термическое сопротивление,  $R_i$ , каждого элемента системы. Причем в теории затвердевания отливки в зависимости от выбранной системы отсчета и ее граничных условий,  $\Delta t$ , задают либо как разность температур жидкой сердцевины отливки и среды

$$\Delta t = t' - t_c \quad (3)$$

или как разность температур поверхности отливки и охладителя

$$\Delta t = t_n - t_c \quad (4)$$

где  $t'$  - температура жидкой сердцевины отливки в рассматриваемый момент времени;  $t_n$  - температура поверхности отливки в рассматриваемый момент времени;  $t_c$  - температура среды.

Использовать выражения (1)-(4) для вычисления коэффициента,  $k$ , в кристаллизаторе установки непрерывного литья затруднительно, так как в них входят величины, которые не поддаются измерению и контролю непосредственно в ходе разлива. Поэтому в теории затвердевания непрерывной отливки принимается ряд упрощений. Например, коэффициент теплопередачи,  $k$ , является постоянной величиной, равной некоторому среднему значению по всей длине кристаллизатора [1]. Такое допущение снижает точность расчета кинетики затвердевания корки в начальный период ее образования. Наиболее полное приближение дают экспериментальные методы, коэффициент теплопередачи рассчитывается на основе экспериментально полученных кривых распределения удельного теплового потока и толщины корки затвердевающего слитка по длине кристаллизатора. На основе

полученных экспериментальных данных по известным формулам рассчитывают распределение коэффициента теплопередачи по длине кристаллизатора.

Изменение коэффициента теплопередачи в системе «непрерывная отливка – кристаллизатор» определяется, в основном, механизмом образования и роста газового зазора, образующегося в результате усадки между поверхностью затвердевающего слитка и стенкой кристаллизатора. Термическое сопротивление зазора составляет 70 ÷ 85% от общего термического сопротивления системы. В настоящее время трудно предсказать с необходимой точностью динамику роста зазора и его теплофизические параметры.

В связи с этим становится очевидным, что изменение коэффициента теплопередачи в кристаллизаторе нельзя описать никаким решением, кроме численного.

В настоящей работе для решения этой задачи используется метод исключения переменных [2]. Характер распределения коэффициента теплопередачи в кристаллизаторе на основании предварительно проведенных исследований, считается известным и описывается функцией, дающей хорошее совпадение с экспериментальной кривой.

Известно, что в установившемся режиме непрерывного литья процесс теплопередачи в кристаллизаторе носит квазистационарный характер, то есть изотермы температурного поля не изменяют своего положения относительно неподвижной системы координат ( $dt/d\tau = 0$ ). Поэтому, пользуясь уравнением сплошности теплового потока при стационарном режиме теплообмена, выражение для определения значения теплового потока в каждый фиксированный момент времени можно записать в виде:

$$q = k' \cdot (t' - tc) = k'' \cdot (tn - tc) = k \cdot (tkp - tc) \quad (5)$$

где  $tkp$  - температура затвердевания расплава;  $k$  - коэффициент теплопередачи от фронта затвердевания;  $k'$  - коэффициент теплопередачи от жидкой сердцевины слитка;  $k''$  – коэффициент теплопередачи с поверхности слитка.

Нетрудно заметить, что если в первых двух членах равенства (5) величина,  $q$ , является функцией двух переменных -  $k'$  и  $t'$  или  $k''$  и  $tn$ , то в третьем лишь одной переменной,  $k$ , так как температура,  $tkp$ , постоянна в течение всего времени затвердевания отливки (либо квазипостоянна, если использовать понятие «спектр затвердевания» для сплавов с небольшим интервалом кристаллизации [3]). Следовательно, изменение величины теплового потока,  $q$ , по длине кристаллизатора будет полностью определяться изменением коэффициента теплопередачи от фронта затвердевания к охладителю,  $k$ , и наоборот.

Анализ большого числа экспериментальных кривых распределения тепловых потоков в кристаллизаторах машин непрерывного литья, приведенных, например, в работах [1,4] показывает, что эти кривые с большой степенью точности можно аппроксимировать функциями параболического вида. А так как между величинами,  $k$ , и  $q$ , существует прямая зависимость, то, следовательно, и функцию,  $k$ , можно приближенно описать параболой  $m$ -го порядка:

$$k = (k_0 - k_E) \left(1 - \frac{\tau}{T}\right)^m + k_E \quad (6)$$

где  $\tau$  - время;  $T$  - время нахождения отливки в кристаллизаторе;  $k_0$  - коэффициент теплопередачи в момент времени  $\tau = 0$ ;  $k_E$  - коэффициент теплопередачи на выходе кристаллизатора, т.е. в момент  $\tau = T$ ;  $m$  - показатель параболы.

или в неподвижной системе координат:

$$k = (k_0 - k_E) \left(1 - \frac{z}{L}\right)^m + k_E \quad (7)$$

где  $z$  - текущая координата в направлении вытягивания слитка;  $L$  – эффективная длина кристаллизатора. Переход от одной системы координат в другую производится с помощью подстановки  $z = V_L \cdot \tau$ ; где  $V_L$  - скорость непрерывного литья.

Выбор параболы обусловлен не только тем, что функция эта хорошо соотносится с опытными данными и проста в математическом отношении, но и тем, что все величины ( $k_0$ ,  $k_\tau$ ,  $m$ ), входящие в уравнения (6), (7) легко рассчитываются, либо поддаются оперативному контролю и измерению непосредственно в ходе разливки. Современные технические средства позволяют делать это с большой точностью в режиме реального времени.

Знание закона изменения коэффициента теплопередачи,  $k$ , вытекающего из положений (5) и (6), позволяет для каждого,  $\tau$ , или,  $z$ , преобразовать соответствующим образом стандартные граничные условия 3-го рода (для одномерной задачи теплопроводности) и свести их следующему виду:

$$k \cdot (t_{кр} - t_c) = n \cdot \lambda \cdot (t_{кр} - t_n) / \xi \quad (8)$$

где  $\xi$  - толщина корочки слитка;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности корки;  $n$  - показатель параболы температурной кривой по толщине корки [4]. Это, свою очередь, существенно упрощает задачу математического моделирования при решении уравнения теплового баланса для вывода аналитического уравнения кинетики затвердевания непрерывного слитка в кристаллизаторе.

Решение дифференциального уравнения составленного в критериальном виде для плоской отливки выражается формулой:

$$\delta = \left\{ \left[ \frac{n(n+1)L}{2Bi} \right] + n(n+1)K Fo \right\}^{1/2} - \frac{n(n+1)L}{2Bi} \quad (9)$$

где  $\delta = \xi / X$  - безразмерная толщина корки;  $L = r / c \cdot \vartheta_{кр}$  - безразмерная теплота кристаллизации;  $K = \sim k / k$  - безразмерный коэффициент теплопередачи;  $Bi = kX / \lambda$  - критерий Био;  $Fo = a \cdot \tau / X^2$  - число Фурье или безразмерное время;  $a = \lambda / c \cdot \rho$  - коэффициент температуропроводности корки;  $\vartheta_{кр} = (t_{кр} - t_c)$  - избыточная температура затвердевания;  $X$  - половина толщины отливки;  $c$  - теплоемкость корки;  $\rho$  - плотность корки;  $r$  - эффективная теплота кристаллизации, включающая теплоту перегрева;  $\tau$  - время;  $k$  - текущее значение коэффициента теплопередачи в момент  $\tau$ , определяемое из уравнения (6);  $n$  - показатель параболы температурной кривой по сечению корки;  $\sim k$  - среднеинтегральное значение коэффициента теплопередачи в интервале времени от 0 до  $\tau$ . Чтобы определить  $\sim k$  необходимо уравнение (6) проинтегрировать в интервале 0 -  $\tau$ :

$$\sim k = \frac{\int_0^\tau k(\tau) d\tau}{\int_0^\tau d\tau} = \frac{k_0 + m \cdot k}{m + 1} \quad (10)$$

Для расчета структуры и свойств отливки важно знать скорость затвердевания, которая может быть найдена непосредственным дифференцированием выражения (9):

$$U = \frac{d\delta}{dFo} = \frac{n(n+1)K}{2 \left\{ \left[ \frac{n(n+1)L}{2Bi} \right]^2 + n(n+1)K Fo \right\}^{1/2}} \quad (11)$$

Предлагаемая математическая модель затвердевания непрерывной отливки в кристаллизаторе учитывает ряд теплофизических параметров, которые контролируются и измеряются непосредственно в процессе непрерывного литья конкретного слитка. Причем взаимосвязь этих теплофизических параметров выражается в виде простых аналитических уравнений в явном виде. Последнее является немаловажным при создании недорогих систем управления процессом непрерывного литья в режиме реального времени.

#### Литература

1. Самсонов В.И., Ан В.С. Тепловые условия первичной кристаллизации при непрерывном горизонтальном литье чугуна. - Литейное производство. №4, 1982.

2. Анисович Г.А. Затвердевание отливок. Мн.: Наука и техника, 1979.
3. Тихомиров М.Д. Основы моделирования литейных процессов. - Литейное производство. №4, 1998, с.30-34.
4. Баранов О.А., Ветров Б.Г., Поль В.Б., Попов А.Д., Филиппов А.С. Непрерывное литье чугуна. М.: Metallurgia, 1968.

УДК 621.747.59:621.785:669.131.7

### **Бейнитный высокопрочный чугун – материал для изготовления зубчатых колес**

Студент гр. 104317 Кузьмич В.Н.  
Научный руководитель – Крутилин А.Н.  
Белорусский национальный технический университет  
г. Минск

Существенное повышение износостойкости, надежности и долговечности деталей из высокопрочного чугуна возможно за счет использования изотермической закалки. Повышенное внимание к этому виду термической обработки обусловлено возможностью значительного повышения физико-механических свойств чугуна, снижения металло- и энергоемкости изготовления деталей. В деталях подвергнутых изотермической закалке создаются условия, обеспечивающие относительно полную релаксацию, как термических, так и фазовых напряжений отливках, что практически исключает опасность появления закалочных трещин.

Микроструктура, возникающая в чугунных отливках после изотермической обработки, наиболее полно удовлетворяет требованиям, которые предъявляются к структурам износостойких сплавов (износостойкость повышается в среднем в 5-7 раз). Кроме того, изотермическая обработка резко улучшает противозадирочные свойства чугуна, как при сухом трении, так и при трении со смазкой. Для повышения долговечности и безотказной работы автомобилей, тракторов требуется обеспечить надежную работу его наиболее ответственных и высоконагруженных в тепловом и механическом отношениях деталей, к числу которых относятся зубчатые и червячные колеса различного назначения. В качестве оптимального материала для изготовления таких деталей, наиболее перспективно применение высокопрочного чугуна с шаровидной формой графита, подвергнутого изотермической закалке.

Высокая эксплуатационная стойкость зубчатых колес из высокопрочного чугуна, подвергнутого изотермической закалке, определяется:

- более низким, по сравнению со сталью, модулем упругости (170000 и 210000 МПа соответственно), что обеспечивает при одинаковых нагрузках увеличение контактной поверхности и соответственно снижение поверхностных напряжений;
- низким коэффициентом трения, хорошей прирабатываемостью, способностью длительное время работать в аварийных условиях при отсутствии смазки;
- высокой стойкостью к абразивному и ударно - абразивному износу, вследствие превращения аустенита в мартенсит в рабочем слое детали при высоких удельных нагрузках;
- высокой демпфирующей способностью материала, благодаря высокой прочности и вязкости матрицы, при этом сферическая форма графита препятствует развитию возникающих магистральных трещин.

Эксплуатационная стойкость колес зависит в основном от двух видов усталости: усталостной прочности при изгибающих нагрузках, возникающих у основания зуба при зацеплении и контактной усталостной прочности, связанной с образованием на поверхности зуба питтинга, который в процессе работы способствует развитию усталостных трещин и разрушению детали. Экспериментальные исследования [1],