

УДК 621.74.047

К ВОПРОСУ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО СЛИТКА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

© 2014 И.А. Пугачёв

Липецкий государственный технический университет

Поступила в редакцию 22.11.2014

Рассмотрены методика и уравнения для расчета затвердевания непрерывного слитка в кристаллизаторе, которые могут быть использованы при разработке АСУП непрерывного литья.

Ключевые слова: *непрерывное литье, кристаллизатор, уравнение затвердевания, математическая модель*

Затвердевание непрерывного слитка в кристаллизаторе и построение адекватной математической модели связано с изменением процесса тепломассообмена в системе «затвердевающая отливка – форма». Основными факторами при этом являются: динамика теплообмена в кристаллизаторе и отвод («снятие») теплоты перегрева жидкой сердцевины. Первый связан, главным образом, с изменением коэффициента теплопередачи системы, второй определяет формирование отливки на начальном этапе. Оба фактора являются ключевыми для расчета кинетики роста корки, распределения температурного поля, выбора оптимальных режимов и стабильности процесса непрерывного литья.

Коэффициент теплопередачи. 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:

$$k = (q/\Delta t) \quad (1)$$

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

где k – общий коэффициент теплопередачи; q – величина удельного теплового потока; Δt – разность температур на границах системы; Ri – 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 Δt в каждый фиксированный момент времени;

термическое сопротивление Ri каждого элемента системы. Причем в теории затвердевания отливки в зависимости от выбранной системы отсчета и ее граничных условий Δt задают, как правило, двояким образом – 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 затруднительно, так как в них входят величины, которые не поддаются измерению и контролю непосредственно в ходе разлива. Кроме того, хорошо известно, что 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 [1]. Однако уровень теоретических знаний в настоящее время не позволяет предсказать с необходимой полнотой динамику роста зазора и его теплофизические параметры. Становится очевидным, что изменение коэффициента теплопередачи в кристаллизаторе нельзя описать никаким решением, кроме численного. Для решения этой задачи используется метод исключения переменных [2, 3]. Применительно к данному случаю метод заключается в том, что характер

Пугачёв Игорь Александрович, доцент кафедры химической технологии, экологии и литья. E-mail: kaf-hitel@stu.lipetsk.ru

распределения коэффициента теплопередачи в кристаллизаторе, на основании предварительно проведенных исследований, считается известным и описывается функцией, дающей хорошее совпадение с экспериментальной кривой, а его использование основано на двух принципиальных положениях, существенно упрощающих решение искомой задачи.

Первое положение заключается в том, что коэффициент k в кристаллизаторе рассматривается как коэффициент теплопередачи от фронта затвердевания к охладителю, а не от жидкой сердцевинки или поверхности слитка, как это обычно принято в теории затвердевания отливки. 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 следующего равенства:

$$q = k' \cdot (t' - t_c) = k'' \cdot (t_n - t_c) = k \cdot (t_{кр} - t_c) \quad (5)$$

где $t_{кр}$ – температура затвердевания расплава; k – коэффициент теплопередачи от фронта затвердевания; k' – коэффициент теплопередачи от жидкой сердцевинки 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 t_n , то в третьем лишь одной переменной k , так как температура $t_{кр}$ постоянна в течение всего времени затвердевания отливки, либо квазипостоянна, если использовать понятие «спектр затвердевания» для сплавов с небольшим интервалом кристаллизации. Следовательно, изменение величины теплового потока q по длине кристаллизатора будет полностью определяться изменением коэффициента теплопередачи от фронта затвердевания к охладителю k и наоборот.

Из первого положения вытекает второе. Анализ большого числа экспериментальных кривых распределения тепловых потоков в кристаллизаторах машин непрерывного литья, приведенных, например, в работах [1, 4–6] показывает, что эти кривые с большой степенью точности можно аппроксимировать функциями параболического вида. Так как между величинами k и q существует линейная зависимость, то, следовательно, и функцию k можно приближенно

описать параболой m -го порядка, используя принцип подобия [7]:

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

где τ – время; T – время нахождения отливки в кристаллизаторе; k_o – коэффициент теплопередачи в момент времени $\tau = 0$; k_e – коэффициент теплопередачи на выходе кристаллизатора, т.е. в момент $\tau = T$; m – показатель параболы. 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_o , k_e , m), входящие в уравнение (6), 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 (методика подробно изложена в работе [8]).

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

$$k \cdot (t_{кр} - t_c) = n \cdot \lambda \cdot (t_{кр} - t_n) / \xi \quad (7)$$

где ξ – толщина корки слитка; λ – коэффициент теплопроводности корки; n – показатель параболы температурной кривой по толщине корки [2].

Приводимые выше положения существенно упрощают задачу математического моделирования кинетики затвердевания непрерывного слитка в кристаллизаторе, так как при составлении систем дифференциальных «балансных» уравнений позволяют сократить количество переменных и выразить решение таких уравнений относительно функции ξ , по аргументу τ в виде простых аналитических зависимостей в явном виде [7].

Теплота перегрева. Влияние теплоты перегрева на процесс затвердевания непрерывного слитка в кристаллизаторе теоретически наиболее просто было бы учитывать величиной q_c плотности теплового потока от расплава к корке в форме закона теплообмена Ньютона:

$$q_c = \alpha_c \cdot (t' - t_{кр}) \quad (8)$$

где α_c – коэффициент теплоотдачи конвекцией; t' – средняя температура жидкого металла сердцевинки слитка в рассматриваемый момент времени.

С точки зрения практического использования такой учет теплоты перегрева не нашел

широкого применения в теории затвердевания непрерывной отливки из-за значительных, часто непреодолимых трудностей, связанных с определением коэффициента α_c . В этом смысле более плодотворными являются приближенные методы учета перегрева, которые требуют дальнейших упрощений. Совершенно ясно, что практическая ценность таких моделей и полученные на их основе решения будут в значительной степени зависеть от того, насколько точно вводимые упрощения отражают реальный процесс.

В теории непрерывного литья теплота перегрева преимущественно учитывается по так называемому «энтальпийному правилу Хворина» [9], т.е. присоединяется к теплоте кристаллизации через введение понятия «эффективная теплота кристаллизации». Если при «обычных» способах литья, когда отливка полностью затвердевает в форме, это допустимо, то при непрерывном литье, когда в кристаллизаторе затвердевает лишь начальная корка слитка, такое, фигурально выражаясь, равномерное «размазывание» теплоты перегрева по всему фронту кристаллизации может приводить к ощутимым погрешностям. А это неприемлемо, например, при разработке АСУП реального времени. Математическая модель процесса должна учитывать воздействие теплоты жидкой сердцевинки на рост корки.

На основании экспериментальных исследований температурного поля жидкой сердцевинки непрерывного слитка хорошо известно, что теплота перегрева постепенно снимается на длине фронта затвердевания в кристаллизаторе, при этом наиболее интенсивно теплота отводится в начальной стадии, т.е. в районе мениска, когда температура расплава близка к температуре заливки, а интенсивность теплоотвода наибольшая. В работе [10] делается предположение, что теплота перегрева снимается по линейному закону на всей длине кристаллизатора. Такое допущение более точно отражает действительность, так как предполагает, что наибольшее количество теплоты перегрева отводится на начальном участке кристаллизатора. Однако анализ показывает, что такой метод является недостаточно точным. Совершенно очевидно, что в зависимости от конкретных параметров процесса (интенсивности теплоотвода, температуры заливки, скорости литья и т.п.) теплота перегрева может быть полностью снята на любом участке кристаллизатора и даже, при определенных условиях, за его пределами.

В работе [11] теплота перегрева Q_{sh} пропорциональна температуре перегрева ΔT и скорости литья w относительно некой «номинальной» температуре перегрева ΔT_o и скорости литья w_o :

$$Q_{sh} = Q_o \cdot (\Delta T \cdot w) / (\Delta T_o \cdot w_o) \quad (9)$$

где Q_o – количество теплоты перегрева, вносимое в кристаллизатор в единицу времени. Авторы не уточняют понятия «номинальной» температуры перегрева, ΔT_o и скорости литья w_o и не указывают их величины, отнеся их, по видимому, к «коммерческой тайне». Поэтому сказать что-либо более определенное о том, как авторы учитывают теплоту перегрева при составлении «балансных» уравнений тепломассообмена в кристаллизаторе, не представляется возможным.

В работе [12] автором было выдвинуто положение, что количество теплоты перегрева Q_{sh} , оставшееся в жидкой сердцевине непрерывной отливки к моменту времени τ , пропорционально общему количеству отводимого тепла в кристаллизаторе, что представляется более естественным. Это положение выражается зависимостью:

$$Q_{sh} = Q_o \left(1 - \frac{\tilde{k} \cdot \tau}{\tilde{k}_{Th} \cdot Th} \right) \quad (10)$$

где $\tilde{k}$ – среднеинтегральное значение коэффициента теплопередачи в кристаллизаторе за время τ ; $\tilde{k}_{Th}$ – среднеинтегральное значение коэффициента теплопередачи за время Th ; τ – текущее время; Th – время отвода теплоты перегрева.

Значения величин $\tilde{k}$ и $\tilde{k}_{Th}$ находят путем интегрирования уравнения (6) в соответствующих интервалах времени - $0 \div \tau$ и $0 \div Th$:

$$\tilde{k} = \frac{(k_o + m \cdot k)}{(m + 1)} \quad (11)$$

Чтобы воспользоваться зависимостями (10) и (11) для составления и решения уравнения теплового баланса затвердевающей отливки в кристаллизаторе, необходимо знать значения $\tilde{k}_{Th}$ и Th . Величины эти можно определить из уравнения теплового баланса элементарной непрерывной отливки. Дальнейший расчет ведется с широким использованием метода последовательных приближений. Современные вычислительные средства делают применение этого метода чрезвычайно эффективным. Методика и алгоритм проведения расчетов всех переменных величин, включая и определение функции ξ по аргументу τ в «явном виде» с учетом положения (10) подробно изложена в работе [12]. Подобные функции являются основой для создания адекватных математических моделей кинетики затвердевания непрерывного слитка и автоматизированных систем управления машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) в режиме реального времени.

Выводы: разработанные методики определения коэффициента теплопередачи и учета влияния теплоты перегрева жидкой сердцевины непрерывного слитка на процесс затвердевания могут быть полезны при создании адекватных математических моделей для систем управления МНЛЗ, выбора оптимальных режимов литья и повышения стабильности процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Попандопуло, И.К. Непрерывная разливка стали / И.К. Попандопуло, Ю.Ф. Михневич. – М: Металлургия, 1990. 296 с.
2. Вейник, А.И. Приближенный расчет процессов теплопроводности. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. 300 с.
3. Анисович, Г.А. Затвердевание отливок. – Минск: Наука и техника, 1979. 298 с.
4. Шатагин, О.А. Непрерывное литье на горизонтальных машинах / О.А. Шатагин, В.Т. Сладкоштанов. – М: Металлургия, 1975. 180 с.
5. Samarasekera, I.V. The continuous-casting mould / I.V. Samarasekera, J.K. Brimacombe // International Metals Reviews. 1978. No6. P. 286-300.
6. Yamauchi, A. Heat Transfer Between Mold and Strand Through Mold Flux Film in Continuous Casting of Steel / A. Yamauchi, K. Sorimachi, T. Sakuraya, T. Fujii // ISIJ International (Japan). 1993. Vol. 33 (1). P. 140-147.
7. Пугачев, И.А. Инженерный метод расчета затвердевания непрерывной отливки в кристаллизаторе / И.А. Пугачев, В.И. Тутов // Литейное производство. 1987. №3(185). С. 119.
8. Пугачев, И.А. Определение коэффициента теплопередачи в системе «затвердевающая отливка – кристаллизатор» при непрерывном литье / И.А. Пугачев, В.И. Тутов // Литейное производство. 1988. №6(200). С. 133.
9. Вейник, А.И. Теория затвердевания отливки. – М: Машгиз, 1961. 435 с.
10. Скотаренко, В.С. Исследование и разработка процесса горизонтального непрерывного литья чугуна. Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. Наук. – М.: ИИИ, 1982. 24 с.
11. Meng, Y. Heat Transfer and Solidification Model of Continuous Slab Casting: CON1D / Y. Meng, B.G. Thomas // Metal. & Material Trans. 2003. Vol. 34B (5). P. 685-705.
12. Пугачев, И.А. Влияние теплоты перегрева на кинетику затвердевания непрерывной отливки в кристаллизаторе / И.А. Пугачев, В.И. Тутов // Литейное производство. 1988. №7(201). С. 115.

TO THE QUESTION OF CONTINUOUS CASTING SLAB SOLIDIFICATION IN CRYSTALLIZER

© 2014 I.A. Pugachev

Lipetsk State Technical University

The methods and equations for calculation the solidification of continuous casting slab in crystallizer which can be used when developing the automating control systems of continuous molding are considered.

Keywords: *continuous molding, crystallizer, solidification equation, mathematical model*