

УДК 621.746.6.001.2

В.Ю. Селиверстов, Т.В. Михайловская, Ю.В. Доценко, Ю.Н. Бура

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЙ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ВЫТЕСНЕНИЯ РАСПЛАВА ИЗ СИФОННОЙ ЛИТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ КРУПНЫХ ОТЛИВОК ИЛИ СЛИТКОВ

Приведено описание физической и математической модели процесса затвердевания металла в системе стояк – устройство для ввода газа. С помощью разработанной модели возможно моделирование процесса затвердевания расплава с различными вариантами конфигурации и размеров холодильника, диаметра стояка, теплофизических свойств металла и формы.

ЛИТНИКОВАЯ СИСТЕМА, ОТЛИВКА, РАСПЛАВ, ЗАТВЕРДЕВАНИЕ, ХОЛОДИЛЬНИК, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ.

Введение

Уменьшение непроизводительных потерь металла, в том числе на литниковую систему при производстве отливок из стали и чугуна является одной из актуальных проблем литейного производства. Одним из наиболее распространенных типов литниковых систем, широко используемых в литейном производстве, является сифонная система подвода металла, применяемая при получении слитков и массивных отливок с высокими служебными свойствами, в том числе, прокатных валков. При этом расход металла на сифонную литниковую систему может составлять 5 – 50 кг и более на тонну отливки или слитка.

Анализ предыдущих публикаций и постановка задачи

Одним из перспективных направлений исследований является применение инертного газа для продувки в изложнице кристаллизующегося сплава. Путем интенсификации тепло- и массообмена внутри затвердевающего слитка можно уменьшить перепад температур по его сечению, а в сочетании с высокими

© Селиверстов В.Ю., Михайловская Т.В.,
Доценко Ю.В., Бура Ю.Н., 2012

скоростями охлаждения жидкого металла подавить диффузию компонентов сплава и устранить макродефекты слитка [1].

В Японии появились сведения о технологии, обеспечивающей получение качественных слитков методом вытеснения жидкого металла из центральной в слиток с повторным использованием центральной [2]. В известном способе жидкая сталь из стопорного ковша через разливочный стакан и стояк заливается в изложницы. Затем в пространство над центральной и ковшом с помощью гидравлического привода вводится уплотнительное устройство с резиновыми прокладками, которое герметизирует полость стояка. В эту полость из баллона подается под давлением инертный газ, например, аргон. Жидкий металл из стояка вытесняется в изложницы, где он затвердевает. После удаления слитков стояк снова может быть использован для очередной заливки.

Недостатком разработанного способа является наличие легкоуязвимой системы соединения стояка и ковша. Кроме того, технологически ненадежным является резиновое уплотнительное устройство, вводимое гидравлическим приводом, из-за высоких температур в зоне центральной и образования брызг и настылей во время заливки.

Все эти недостатки устранены в устройствах [3 – 6], в которых герметизация расплава от окружающей среды производится за счет использования металлического холодильника, обеспечивающего ускоренное затвердевание металла и подвод газа для вытеснения расплава из центральной в слиток.

Актуальной задачей по определению термовременных параметров использования данных разработок при литье слитков и отливок различных типоразмеров и массы является установление момента затвердевания металла в зазоре между металлическим холодильником-газоподводом и огнеупорной центральной трубкой в данном конкретном случае реализации технологии.

Поэтому целью исследований являлась разработка физической и математической моделей этого процесса, учитывающих наиболее значимые характеристики металла, холодильника и литейной формы стояка (центральной).

Результаты исследований

Разработано два варианта физической модели процесса затвердевания в системе стояк – устройство для ввода газа. На рис. 1 приведена схема формы стояка (центральной), вариантов размещения холодильника и жидкого металла, которые рассмотрены при моделировании.

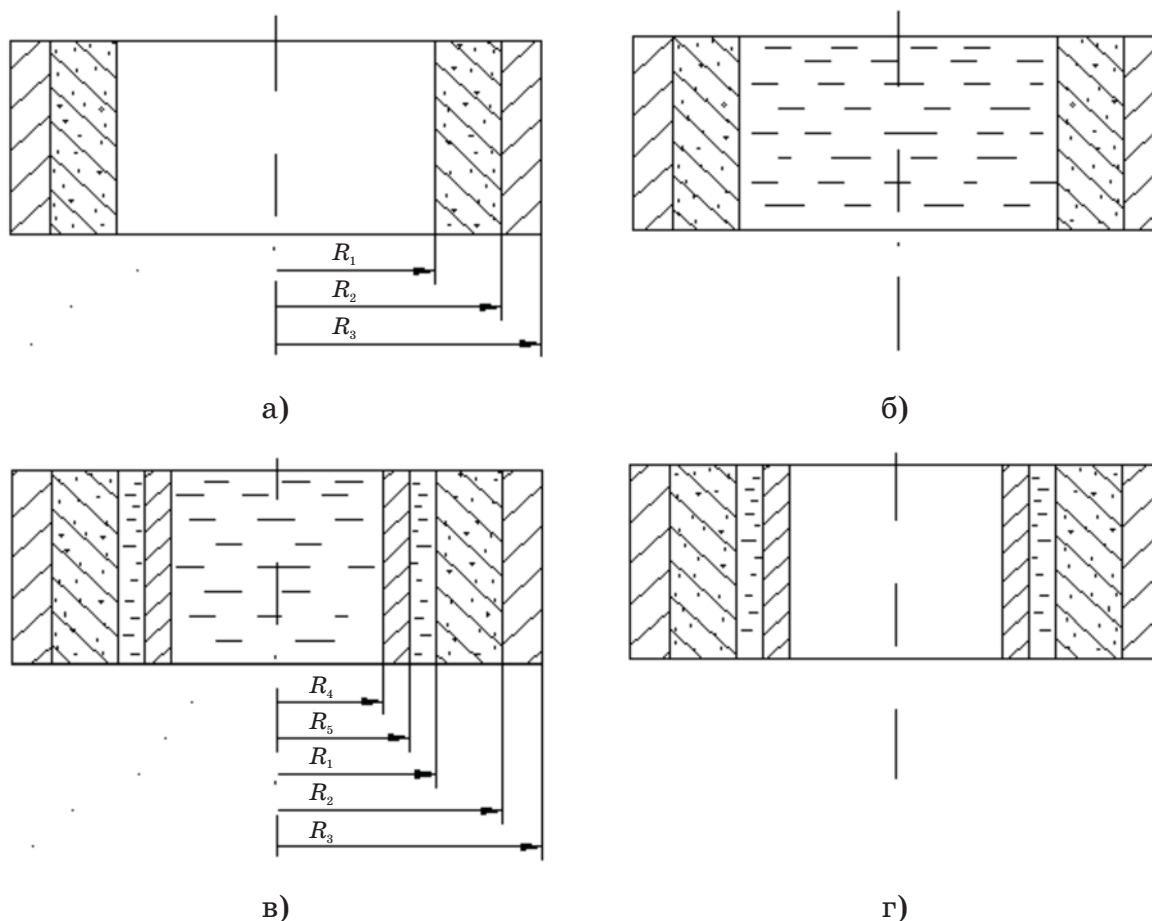


Рис. 1. Схема литейной формы и различных вариантов моделирования:
 а – исходные размеры центральной; б – этап заливки расплава;
 в – вариант погружения в расплав трубы-холодильника;
 г – вариант погружения в расплав герметизированного трубчатого холодильника

В первой модели приняты следующие исходные условия: наружная часть формы (рис. 1, а) выполнена из серого чугуна с наружным радиусом R_3 и внутренним – R_2 . Внутренняя часть формы заполнена однородной огнеупорной смесью с внутренним радиусом R_1 .

Моделирование течения жидкого металла (рис. 1, б) через центровую в процессе заливки производили при условии нахождения

расплава в форме при постоянной температуре t_3 в течение заданного промежутка времени τ и отсутствия затвердевания металла на стенках формы.

Предполагался только прогрев формы при идеальных условиях контакта материала формы с жидким металлом.

Следующим этапом моделирования является погружение в расплав устройства для ввода газа с металлическим трубчатым холодильником (рис. 1, в) с внутренним и наружным радиусами R_4 и R_5 сразу после окончания заливки.

Начальная температура холодильника принимается равной t_x^0 . С этого момента времени начинается затвердевание металла в центровой за счет нагрева холодильника и элементов формы. В процессе теплообмена снимается тепло перегрева жидкого металла.

Процесс затвердевания происходит в интервале температур ликвидус – t_L , солидус – t_S . В зависимости от исходных теплофизических параметров холодильник может расплавиться или оставаться в твердом состоянии. Окончанием процесса является полное затвердевание металла. Во второй модели исходные условия первых двух этапов моделирования соответствуют этапам первой модели, приведенной выше (см. рис. 1, а, б). На третьем этапе (рис. 1, г) после окончания заливки в расплав вводится герметизированный цилиндрический контейнер-холодильник, внутренняя полость которого заполнена газом. С этого момента времени начинается затвердевание металла в зазоре между наружной поверхностью контейнера-холодильника и внутренней поверхностью формы центровой.

При уменьшении радиуса R_4 до нуля моделируется процесс затвердевания расплава в зазоре при использовании кольцевого холодильника. Предусмотрена возможность изменения основных теплофизических свойств литейной формы и расплава. В начальных условиях температура элементов формы (1 и 2) принята равной $t_{сф}$.

Для описания процесса теплообмена в рассмотренной выше системе (с учетом фазовых превращений) использовали подход, основанный на применении метода энтальпии [7, 8]. Уравнение теплопроводности в этом случае запишется для произвольной фазы как

$$\rho \frac{\partial i}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \quad (1)$$

где ρ – плотность; λ – теплопроводность; i – энтальпия; t – температура; r – координата; τ – время.

Связь между энтальпией и температурой должна быть задана в виде функциональной зависимости вида $i = f(t)$. Приближенно ее можно представить как кусочно-линейную

$$i = \begin{cases} c_s t, & t < t_s; \\ i_s + L\theta, & t_s \leq t < t_L; \\ i_L + c_L (t - t_L), & t \geq t_L, \end{cases} \quad (2)$$

где c_s , c_L – средние теплоемкости при температуре t_s и t_L соответственно;

i_s , i_L – энтальпии при тех же температурах;

L – температура фазового перехода, $L = i_s - i_l$; $\theta = \frac{t - t_s}{t_l - t_s}$.

Аналогично может быть задана зависимость вида $t = \phi(i)$:

$$t = \begin{cases} i / c_s, & i < i_s; \\ t_s + \frac{i - i_s}{L} (t_L - t_s), & i_s \leq i < i_L; \\ t_L + \frac{i - i_L}{c_L}, & i \geq i_L, \end{cases} \quad (3)$$

Для материалов, в которых не происходят фазовые превращения (смесь, форма), используется обычное уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) \quad (4)$$

где a – коэффициент температуропроводности.

Для привязки рассмотренных выше уравнений к каждому конкретному элементу будем использовать следующие индексы: M_1 – для внутреннего слоя расплава, x – для холодильника, M_2 – для расплава, находящегося в зазоре между холодильником и смесью, c – для смеси, Φ – для формы, M – для холодильника и расплава. Тогда математическая постановка задачи примет вид:

– **Форма**

-- Уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial t_{\Phi}}{\partial \tau} = a_{\Phi} \left(\frac{\partial^2 t_{\Phi}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_{\Phi}}{\partial r} \right). \quad (5)$$

-- Граничные условия $R_2 < r < R_3$:

а) граница смесь-форма

$$-\lambda_{\Phi} \frac{\partial t_{\Phi}}{\partial r} = -\lambda_c \frac{\partial t_c}{\partial r}, t_{\Phi} = t_c \quad \text{при } r = R_2, \quad (6)$$

б) внешняя граница формы

$$\frac{\partial t_{\Phi}}{\partial r} = 0 \quad \text{при } r = R_3. \quad (7)$$

-- Начальные условия

$$t_{\Phi}(r, t) = t_{c\Phi}^0 \quad \text{при } \tau = 0. \quad (8)$$

– Смесь

-- Уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial t_c}{\partial t} = a_c \left(\frac{\partial^2 t_c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_c}{\partial r} \right) \quad \text{при } R_1 < r < R_2. \quad (9)$$

-- Граничные условия:

а) внутренняя граница смеси

$$\left. \begin{aligned} t_c = t_3 \quad \text{при } 0 \leq \tau \leq \tau_1, \\ -\lambda_{M_2} \frac{\partial t_{M_2}}{\partial r} = -\lambda_c \frac{\partial t_c}{\partial r}, t_{M_2} = t_c \quad \text{при } \tau > \tau_1 \end{aligned} \right| r = R_1, \quad (10)$$

б) наружная граница смеси – уравнение (6).

-- Начальные условия

$$t_c(r, t) = t_{c\Phi}^0 \quad \text{при } \tau = 0. \quad (11)$$

– **Расплав, находящийся в зазоре между холодильником и смесью**

-- Уравнение теплопроводности

$$\rho_{M_2} \frac{\partial i_{M_2}}{\partial \tau} = \lambda_M \left(\frac{\partial^2 t_{M_2}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_{M_2}}{\partial r} \right) \quad \text{при } R_5 < r < R_1. \quad (12)$$

-- Граничные условия:

а) граница холодильник-расплав

$$-\lambda_M \frac{\partial t_x}{\partial r} = -\lambda_M \frac{\partial t_{M_2}}{\partial r}, t_x = t_{M_2} \quad \text{при } r = R_5, \tau = \tau_1, \quad (13)$$

б) граница расплав-смесь

$$-\lambda_{M_2} \frac{\partial t_{M_2}}{\partial r} = -\lambda_c \frac{\partial t_c}{\partial r}, t_{M_2} = t_c \quad \text{при } r = R_1, \tau > \tau_1. \quad (14)$$

-- Начальные условия

$$t_{M_2}(r, \tau) = t_3 \quad \text{при } \tau = \tau_1. \quad (15)$$

– **Холодильник**

-- Уравнение теплопроводности

$$\rho_M \frac{\partial i_x}{\partial r^2} = \lambda_M \left(\frac{\partial^2 t_x}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_x}{\partial r} \right). \quad (16)$$

-- **Граничные условия:**

а) внутренняя граница

$$-\lambda_M \frac{\partial t_{M_1}}{\partial r} = \lambda_M \frac{\partial t_x}{\partial r}, \quad t_{M_1} = t_x \quad \text{при } \tau = \tau_1, \quad (17)$$

б) наружная граница – уравнение (13).

-- **Начальные условия**

$$t_x(r, \tau) = t_x^0 \quad \text{при } \tau = \tau_1. \quad (18)$$

– **Внутренний слой расплава**

-- Уравнение теплопроводности

$$\rho_M \frac{\partial i_M}{\partial \tau} = \lambda_M \left(\frac{\partial^2 t_{M_2}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_{M_1}}{\partial r} \right) \quad \text{при } 0 < r < R_4. \quad (19)$$

-- **Граничные условия:**

а) на оси расплава

$$\lambda_M \frac{\partial t_{M_1}}{\partial r} = 0 \quad \text{при } r = 0, \tau > \tau_1, \quad (20)$$

б) на границе с холодильником – уравнение (17).

-- **Начальные условия**

$$t_{M_1}(r, \tau) = t_3 \quad \text{при } \tau = \tau_1. \quad (21)$$

Система уравнений (5 – 21), дополненная зависимостями (2 – 3) для расплава и холодильника, представляет собой математическую постановку задачи, соответствующую исходной физической модели.

Для решения поставленной задачи использовали метод конечных разностей. Построение разностных уравнений выполняли с помощью метода интегральных тепловых балансов [9].

При расчете методом конечных разностей применили неявную схему, которая в отличие от явной, всегда устойчива. Хотя машинное время расчета процесса затвердевания расплава в системе стояк-холодильник по неявной схеме несколько увеличивается, при ее использовании можно произвольно выбирать значения шагов по радиусу и времени, что является важнейшим преимуществом по сравнению с явной схемой.

Каждый элемент расчетной области разбивается на элементарные объемы (рис. 2). Шаг разбиения постоянный внутри каждого элемента, но разный для расплавов, холодильника, смеси и формы. Внутри каждого элементарного объема вводится узел, к которому относятся все его теплофизические параметры. Число узлов N выбирается отдельно для каждого элемента.

Адаптацию модели проводили с помощью данных, полученных при экспериментальных исследованиях процесса нагрева формы и кристаллизации металла в стояке [10, 11].

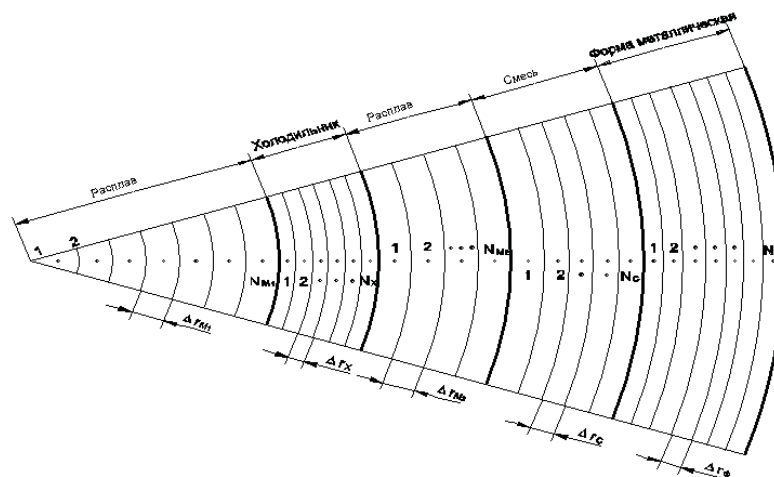


Рис. 2. Схема выделения элементарных объемов в расчетной области

Полученные результаты отдельных расчетов для различных значений температур t_S и t_L , а также при наличии и отсутствии перегрева и предварительного прогрева смеси и формы подтверждают данные экспериментальных исследований, что при нормальных условиях затвердевание металла в зазоре между центральной огнеупорной трубкой и холодильником происходит через $\sim 10 - 15$ секунд. Таким образом, для предотвращения утечки газа в атмосферу момент подачи его в центровую должен начинаться более чем через $10c$ и с учетом других трудно учитываемых факторов составит $15 - 20 c$. Увеличение паузы между окончанием заливки и подачей газа может привести к затвердеванию питателя (разводок).

Выводы

1. Разработана физическая модель двух вариантов процесса затвердевания металла в системе стояк – устройство для ввода газа. Модель описывает состояние элементов указанной системы до заливки расплава в литейную форму, во время заполнения формы

металлом, а также состояние системы и проходящие в ней процессы после введения металлического холодильника.

2. Процесс теплообмена в системе описывали с применением метода энтальпии, учитывая фазовые превращения. Представлены уравнения теплопроводности, граничные и начальные условия для формы, смеси, холодильника, расплава в зазоре между холодильником и огнеупорной проводкой, внутреннего слоя расплава.

3. Поставленную задачу решали с использованием метода конечных разностей. Получены расчетные формулы, позволяющие моделировать процесс теплообмена, изменяя значения некоторых основных исходных данных. С помощью разработанной модели возможно моделирование процесса затвердевания расплава с различными вариантами конфигурации и размеров холодильника, диаметра стояка, теплофизических свойств металла и формы.

4. Составлен алгоритм расчета процесса затвердевания отливки. Для адаптации модели использовали данные экспериментальных исследований процесса нагрева формы и кристаллизации металла в стояке. Как показали расчеты, затвердевание стали в зазоре между огнеупорной проводкой и трубой-холодильником проходит в течение примерно 10 с, что практически соответствует результатам экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ефимов В.А. Перспективы развития работ по применению внешних воздействий на жидкий и кристаллизующийся расплав // Влияние внешних воздействий на жидкий и кристаллизующийся металл. - Киев: ИПЛ АН УССР, 1983. - С. 3-21.
2. Заявка N 59-215248 Япония. Способ разлива стали. - МКИ В22Д 7/00, В22Д 18/04. Оpubл. 05.12.84. / Син Ниппон сэйтэцу К.К. - РЖ ТОЛП, 1986.- N 1, 1Г191П.
3. А.С. СССР N 1582454. Способ изготовления отливок и устройство для его осуществления / Хрычиков В.Е., Котешов Н.П. и др., 1990. ДСП.
4. А.С. СССР N 1587777. Устройство для сифонной разлива / Хрычиков В.Е., Котешов Н.П. и др., 1990. ДСП.
5. Пат. 28858 Украина, МПК (2006) В22D 18/00. Спосіб отримання виливків / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Доценко Ю.В. - № 200708968; заявл.03.08.2007; опубл. 25.12.2007, Бюл.№21.
6. Пат. 28859 Украина, МПК (2006) В22D 18/00. Пристрій для отримання виливків / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Доценко Ю.В. - № 200708969; заявл.03.08.2007; опубл. 25.12.2007, Бюл.№21.
7. Авдонин Н.А. Математическое описание процессов кристаллизации. - Рига: Знание, 1980. - 177с.

8. Шамсундар, Спэрроу. Применение метода энтальпии к анализу многомерной задачи теплопроводности при наличии фазового перехода. – Труды амер. об-ва инж.-мех.. серия Теплопередача. – 1976. - №3. – С. 14-23.
9. Калиткин Н.Н. Численные методы.- М.: Наука, 1978.- 612 с.
10. Хрычиков В.Е., Селиверстов В.Ю. Исследование динамики нагрева стальной огнеупорных центровых трубок при сифонной заливке слитков //Металлургическая и горнорудная промышленность. Днепропетровск, 2001, №4, с. 33-35.
11. Селиверстов В.Ю., Хрычиков В.Е. Термографическое исследование процессов нагрева и охлаждения литейной формы стояка при заливке чугуна //Металлургическая и горнорудная промышленность. Днепропетровск, 2001, №5, с. 33-35.