



Computer modeling of the liquid phase length of the ingot moving in MNLZ with predetermined speed on the basis of three-dimensional equation of heat conduction and models, considering changing of carbon concentration in liquid and solid phase at crystallization, is described. There are determined effective lengths of stretch of the liquid phase which can be formed in slug with circular section.

А. Н. ЧИЧКО, БНТУ, Н. В. АНДРИАНОВ, А. В. ДЕМИН, РУП «БМЗ»,
Д. М. КУКУЙ, В. Ф. СОБОЛЕВ, Ю. В. ЯЦКЕВИЧ, О. И. ЧИЧКО, БНТУ

УДК 669.27:519

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЖИДКОЙ ФАЗЫ В СЛИТКЕ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ, КРИСТАЛЛИЗУЮЩЕЙ В МНЛЗ

Одной из важнейших характеристик процесса вытягивания слитка в машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) является задача расчета длины жидкой фазы. На длину жидкой фазы слитка влияют условия охлаждения, скорость движения слитка, температура разливки, марка стали и другие технологические характеристики. В зависимости от того, где заканчивается жидкая фаза в МНЛЗ, выбирается положение тянущих роликовых механизмов. Это связано с пластическими свойствами слитка, которые различаются в зависимости от соотношения и протяженности жидкой и твердой фаз стали. Поэтому определение длины жидкой фазы – основной вопрос при разработке технологии получения слитков. Существующие методы оценки длины жидкой фазы в движущемся слитке основываются на полуэмпирических зависимостях [1, 2] и не позволяют учесть при расчете размеры зон вторичного охлаждения и изменения коэффициентов теплоотдачи в пространстве слитка. В то же время решение тепловой задачи затвердевания для слитка в трехмерном случае позволяет определить протяженность длины жидкой фазы в зависимости от пространственного положения зон вторичного охлаждения, размеров кристаллизатора, а также размеров воздушных прослоек по всей длине слитка. Как известно, основными теплофизическими характеристиками, влияющими на длину жидкой лунки, являются температура и скорость разливки, а также коэффициенты теплоотдачи (K_1, K_2, K_3) в зонах вторичного охлаждения (ЗВО), зависящие от расходов воды. Перечисленные выше характеристики являлись основными варьируемыми теплотехническими параметрами при расчетах длины жидкой лунки.

Цель настоящей работы – математическое моделирование длины жидкой фазы слитка, движущегося в МНЛЗ с заданной скоростью на основе трехмерного уравнения теплопроводности и моделей, учитывающих изменение концентрации углерода в жидкой и твердой фазах при кристаллизации.

В качестве математической модели для расчета температур кристаллизующегося слитка использовали трехмерное дифференциальное уравнение теплопроводности [3–5]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{c(T)\rho} \left(F_x + F_y + F_z + Q_{кр} \frac{\partial \rho_{sol}}{\partial \tau} \right), \quad (1)$$

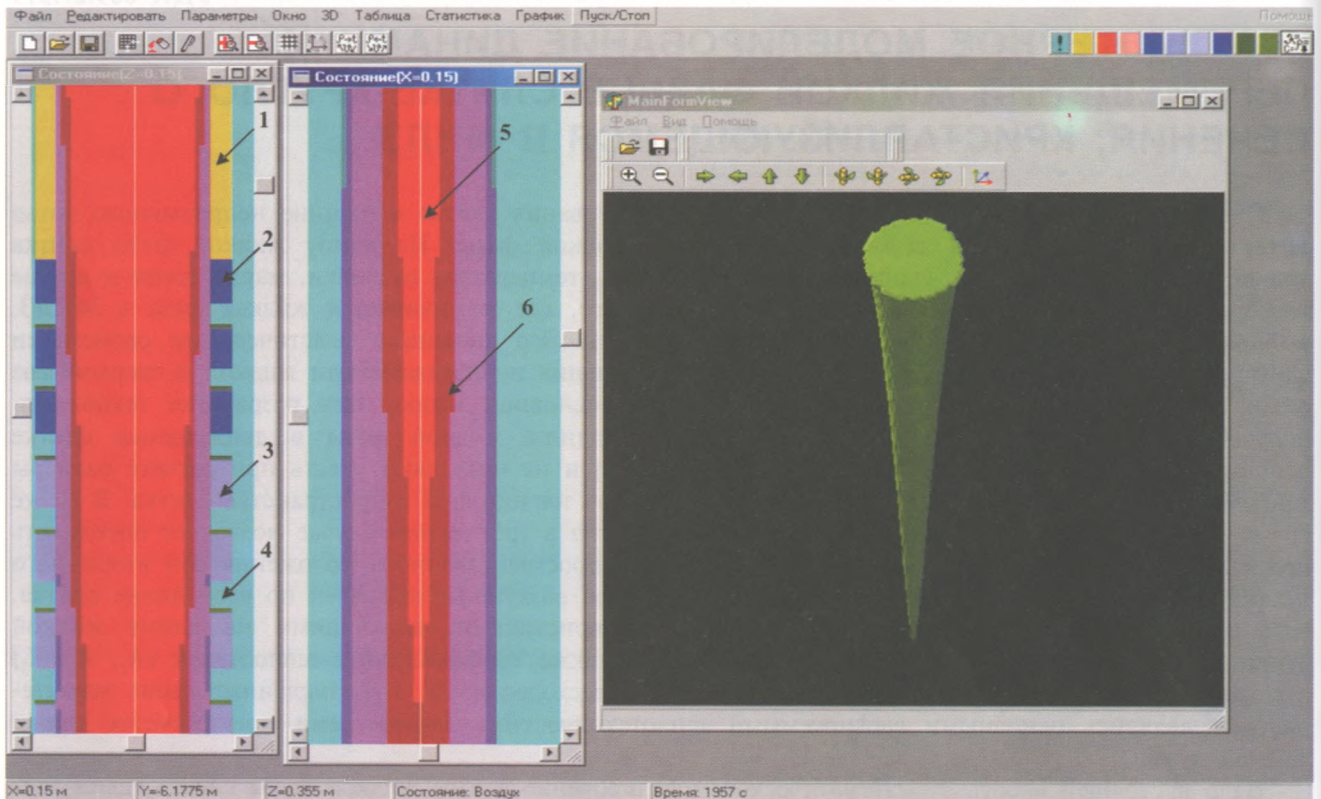
где

$$F_i = \begin{cases} \frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial i} \right)}{\partial i}, & \text{если } R(x, y, z) \in \Omega_M, \\ \frac{\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial i} - k(T - T_{cp})}{\partial i}, & \text{если } R(x, y, z) \in \Omega_{M-cp}, \end{cases} \quad (2)$$

T – температура в точках x, y, z слитка; T_{cp} – температура внешней среды (постоянная величина – 25°C); τ – время; $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности материала при температуре T ; $c(T)$ – удельная теплоемкость материала при температуре T ; ρ_{sol} и ρ_{lic} – соответственно плотность твердой и

жидкой фазы; $\rho = \rho_{sol} + \rho_{liq}$ – приведенная плотность материала; x, y, z – декартовы координаты; $Q_{кр}$ – удельная теплота кристаллизации металла; k – коэффициент теплоотдачи поверхности металла в охлаждающую среду; Ω_M – пространство точек металла; $\Omega_{M-ср}$ – пространство точек границы металл–среда.

Процесс образования твердой фазы моделировали как увеличение плотности твердой фазы и уменьшение плотности жидкой фазы в точках пространства с каждым тактом моделирования [6, 7]. В основу теоретического расчета длины жидкой лунки положены математические модели кристаллизации, включая уравнения теплопроводности, диффузии, а также законы тепловыделения, т.е. при расчете длины жидкой лунки использован клеточный автомат с построенной пространственной структурой 20-метрового стального слитка круглого сечения. На основе представленного математического формализма была разработана программа для расчета температурного поля в пространстве кристаллизующегося слитка. По этой программе рассчитывали длину жидкой фазы кристаллизующегося слитка. Интерфейс рассчитываемой программы показан на рисунке.



Фрагмент вычисления длины жидкой фазы кристаллизующегося круглого слитка из стали 45: 1 – кристаллизатор; 2 – зоны вторичного охлаждения I; 3 – зоны вторичного охлаждения II; 4 – воздушная прослойка; 5 – расплав; 6 – закристаллизованный металл

В [7] приведена схема моделируемого процесса кристаллизации слитка, движущегося по радиусу дуги МНЛЗ, и указаны размеры зон рассчитываемого слитка, соответствующие МНЛЗ-3, используемой на РУП «БМЗ». Эта геометрическая схема и была положена в основу настоящей статьи. В качестве условий для численного решения дифференциального уравнения (1) и дополнительных, которые представлены в работе [7], использовали:

начальные условия:

$$\begin{cases} T(x, y_0, z) = T_{зал}, \\ T(x, y \neq y_0, z) = 0^\circ\text{C}, \end{cases} \quad \begin{cases} \rho_{lic}(x, y_0, z) = 7600 \text{ кг/м}^3, \\ \rho_{lic}(x, y \neq y_0, z) = 0 \text{ кг/м}^3, \end{cases} \quad \rho_{sol}(x, y, z) = 0 \text{ кг/м}^3, \quad C_{lic}(x, y, z) = C_0, \quad C_{sol}(x, y, z) = 0,$$

где y_0 – координата верхнего уровня расплава в кристаллизаторе; $T_{зал}$ – температура разливки расплава; C_0 – начальная концентрация углерода в расплаве;

граничные условия: $T(y_1) = T_{кр}$, где y_1 – координаты кристаллизатора; $T_{кр}$ – температура кристаллизатора (500°C); $T(y_2) = T_{ср}$, где y_2 – координаты зоны вторичного охлаждения I; $T_{ср}$ –

температура воды (20°C); $T(y_3) = T_{cp}$, где y_3 – координаты зоны вторичного охлаждения 2; T_{cp} – температура воды (20°C); $T(y_4) = T_{cp}$, где y_4 – координаты зоны вторичного охлаждения 3; T_{cp} – температура воды (20°C); $T(y_5) = T_p$, где y_5 – координаты роликов; T_p – температура роликов (200°C); $T(y_6) = T_b$, где y_6 – координаты воздуха; T_b – температура воздуха (20°C); $k(y_1) = 2100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, где y_1 – координаты кристаллизатора; $k(y_2) = 1200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, где y_2 – координаты зоны 1; $k(y_3) = 464 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, где y_3 – координаты зоны 2; $k(y_4) = 232 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, где y_4 – координаты зоны 3; $k(y_5) = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, где y_5 – координаты роликов; $k(y_6) = 173 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, где y_6 – координаты зоны воздушного охлаждения.

Фрагменты результатов расчета длины жидкой лунки для различных теплотехнических характеристик МНЛЗ приведены в таблице. В расчетах были выделены два уровня изменения перечисленных выше параметров. Для температуры заливки в качестве нижнего уровня принята температура 1540 °С, а в качестве верхнего – 1560 °С. Для скорости вытяжки нижний уровень параметра составил 0,5 м/мин, а верхний – 0,7 м/мин. Коэффициент теплоотдачи в ЗВО-1 составил 900 Вт/(м²·К) на нижнем уровне и 1400 Вт/(м²·К) – на верхнем, коэффициент теплоотдачи в ЗВО-2 – 700 Вт/(м²·К) на нижнем уровне и 1200 Вт/(м²·К) – на верхнем. Коэффициент теплоотдачи в ЗВО-3 – 600 Вт/(м²·К) на нижнем уровне и 1100 Вт/(м²·К) – на верхнем. В таблице приведены результаты совместного влияния перечисленных выше факторов на длину жидкой фазы. Наибольшая длина (13,628 м) жидкой фазы достигается при температуре заливки 1560 (+1) °С, скорости вытяжки 0,7 (+1) м/мин и коэффициентах теплоотдачи в ЗВО: 1400 (+1) Вт/(м²·К) (ЗВО-1), 700 (-1) Вт/(м²·К) (ЗВО-2),

Влияние теплотехнических характеристик двух уровней процесса вытягивания на длину жидкой фазы слитка круглого сечения из стали 20

Температура заливки T , °С	Скорость вытяжки v , м/мин.	Коэффициент теплоотдачи ЗВО-1 K_1 , Вт/(м²·К)	Коэффициент теплоотдачи ЗВО-2 K_2 , Вт/(м²·К)	Коэффициент теплоотдачи ЗВО-3 K_3 , Вт/(м²·К)	Длина жидкой фазы L , м
1540 (-1)	0,5 (-1)	900 (-1)	700 (-1)	600 (-1)	8,905
1560 (+1)	0,5 (-1)	900 (-1)	700 (-1)	600 (-1)	9,060
1540 (-1)	0,7 (+1)	900 (-1)	700 (-1)	600 (-1)	13,269
1560 (+1)	0,7 (+1)	900 (-1)	700 (-1)	600 (-1)	13,539
1540 (-1)	0,5 (-1)	1400 (+1)	700 (-1)	600 (-1)	8,720
1560 (+1)	0,5 (-1)	1400 (+1)	700 (-1)	600 (-1)	8,880
1540 (-1)	0,7 (+1)	1400 (+1)	700 (-1)	600 (-1)	13,020
1560 (+1)	0,7 (+1)	1400 (+1)	700 (-1)	600 (-1)	13,290
1540 (-1)	0,5 (-1)	900 (-1)	1200 (+1)	600 (-1)	8,520
1560 (+1)	0,5 (-1)	900 (-1)	1200 (+1)	600 (-1)	8,680
1540 (-1)	0,7 (+1)	900 (-1)	1200 (+1)	600 (-1)	12,730
1560 (+1)	0,7 (+1)	900 (-1)	1200 (+1)	600 (-1)	13,000
1540 (-1)	0,5 (-1)	1400 (+1)	1200 (+1)	600 (-1)	8,370
1560 (+1)	0,5 (-1)	1400 (+1)	1200 (+1)	600 (-1)	8,530
1540 (-1)	0,7 (+1)	1400 (+1)	1200 (+1)	600 (-1)	12,530
1560 (+1)	0,7 (+1)	1400 (+1)	1200 (+1)	600 (-1)	12,790
1540 (-1)	0,5 (-1)	900 (-1)	700 (-1)	1100 (+1)	8,420
1560 (+1)	0,5 (-1)	900 (-1)	700 (-1)	1100 (+1)	8,560
1540 (-1)	0,7 (+1)	900 (-1)	700 (-1)	1100 (+1)	12,470
1560 (+1)	0,7 (+1)	900 (-1)	700 (-1)	1100 (+1)	12,710
1540 (-1)	0,5 (-1)	1400 (+1)	700 (-1)	1100 (+1)	8,270
1560 (+1)	0,5 (-1)	1400 (+1)	700 (-1)	1100 (+1)	8,410
1540 (-1)	0,7 (+1)	1400 (+1)	700 (-1)	1100 (+1)	12,270
1560 (+1)	0,7 (+1)	1400 (+1)	700 (-1)	1100 (+1)	12,510
1540 (-1)	0,5 (-1)	900 (-1)	1200 (+1)	1100 (+1)	8,120
1560 (+1)	0,5 (-1)	900 (-1)	1200 (+1)	1100 (+1)	8,260
1540 (-1)	0,7 (+1)	900 (-1)	1200 (+1)	1100 (+1)	12,050
1560 (+1)	0,7 (+1)	900 (-1)	1200 (+1)	1100 (+1)	12,290
1540 (-1)	0,5 (-1)	1400 (+1)	1200 (+1)	1100 (+1)	7,990
1560 (+1)	0,5 (-1)	1400 (+1)	1200 (+1)	1100 (+1)	8,130
1540 (-1)	0,7 (+1)	1400 (+1)	1200 (+1)	1100 (+1)	11,880
1560 (+1)	0,7 (+1)	1400 (+1)	1200 (+1)	1100 (+1)	12,110

600 (-1) Вт/(м²·К) (ЗВО-3). Наименьшая длина, равная 7,99 м, достигается при температуре заливки 1540 (-1) °С, скорости вытяжки 0,5 (-1) м/мин и коэффициентах теплоотдачи в ЗВО: 1400 (+1) Вт/(м²·К) (ЗВО-1), 1200 (+1) Вт/(м²·К) (ЗВО-2), 1100 (+1) Вт/(м²·К) (ЗВО-3). Таким образом, в зависимости от теплотехнических параметров разлива разброс положения жидкой фазы при длине слитка 20 м может составлять около 5 м.

Проведенное компьютерное моделирование позволило рассчитать длину жидкой фазы, которая может образовываться в заготовке круглого сечения в реальной МНЛЗ. Так, изменение коэффициентов теплоотдачи в первой зоне на ±22% (основной уровень 1150 ±250 Вт/(м²·К)), во второй зоне на ±26% (основной уровень 950 ±250 Вт/(м²·К)), в третьей зоне на ±29% (основной уровень 850 ±250 Вт/(м²·К)) при интервале скорости ±0,1 м (основной уровень 0,6±0,1 м) и температуре заливки ±10 °С (основной уровень 1550 ±10 °С) приводит к колебанию положения зоны жидкой фазы в пределах 5 м. На основании этих данных можно выбирать положение тянущих роликов в МНЛЗ.

Приведенные модели и математический аппарат могут быть использованы для расчета длины жидкой фазы в слитках различного сечения при всевозможных размерах зоны вторичного охлаждения.

Литература

1. Евтеев Д.П., Колыбалов И.Н. Непрерывное литье стали. М.: Металлургия, 1984.
2. Затвердевание и кристаллизация стальных слитков. Шмрга Л.: Пер. с чешск. / Под ред. В.И. Кашина. М.: Металлургия, 1985.
3. Чичко А.Н., Дроздов Е.А. Компьютерное моделирование термоупругости сплавов, кристаллизующихся в трехмерных пространственных структурах // Докл. НАН Беларуси. 2002. Т.46. №1. С. 115–119.
4. Чичко А.Н., Кукуй Д.М., Андрианов Н.В. и др. Моделирование влияния охлаждаемых и неохлаждаемых роликов на температуры и напряжения поверхности промышленного слитка в зоне вторичного охлаждения // Литье и металлургия. 2003. №3. С. 131–138.
5. Чичко А.Н., Яцкевич Ю.В., Соболев В.Ф., Чичко О. И. Компьютерное моделирование в задачах термоупругости сложных пространственных деталей // Изв. вузов. Энергетика. 2003. № 3. С. 68–74.
6. Чичко А.Н., Кукуй Д.М., Соболев В.Ф. и др. Компьютерная система «ПроНРС» и трехмерное моделирование распределения температур, напряжений и углерода в процессе непрерывной разлива стали // Литье и металлургия. 2002. №3. С. 21–27.
7. Чичко А. Н., Андрианов Н. В., Демин А. В. и др. Численное моделирование напряжений вблизи поверхности в слитке круглого сечения, кристаллизующемся при круглофакельном вторичном охлаждении // Литье и металлургия. 2004. № 4. С. 57–63.