

МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА КОРочки МЕТАЛЛА В СОРТОВОМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ ПРИ СМЕЩЕНИИ СТРУИ ОТНОСИТЕЛЬНО ЕГО ОСИ

Ячиков И.М.¹, д.т.н., профессор кафедры вычислительной техники
и программирования (jachikov@mail.ru)

Вдовин К.Н.¹, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Литейное производство и материаловедение»
Марочкин О.А.², технический эксперт

Точилкин В.В.¹, аспирант кафедры «Литейное производство и материаловедение»

¹Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
(455000, Россия, Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

²ООО «Внедрение Новых Технологий и Оборудования»
(455037, Россия, Магнитогорск, пр. К. Маркса, 111/2–18)

Аннотация. Представлена математическая модель для нахождения характера движения жидкого металла во внутренней полости сортового кристаллизатора и его скорости вблизи затвердевающей корочки на основе теории свободной и ограниченной затопленной струи. Выбрана математическая модель для определения теплового потока при движении жидкой перегретой стали с заданной скоростью вдоль двухфазной границы. На основе этого предложена математическая модель для нахождения изменения толщины корочки слитка по высоте сортового квадратного кристаллизатора на разных его поверхностях и на выходе по его периметру при горизонтальном смещении оси струи подаваемого в кристаллизатор металла. Проведено компьютерное моделирование асимметрии роста корочки по периметру и высоте гильзы сортового кристаллизатора квадратного сечения 150×150 при смещении оси открытой струи металла. Установлено, что горизонтальное смещение оси открытой струи металла на 40 мм может приводить к локальному изменению толщины корочки на выходе из кристаллизатора на левой стенке до 2 мм.

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок, сортовой кристаллизатор, корочка металла, модель Стефана, двухфазная граница, струя металла, математическая модель.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-1-24-29

Создание, развитие и модернизация элементов сортовых машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), в частности кристаллизаторов – важная задача современной металлургической промышленности, решение которой обеспечивает повышение производительности и качества выпускаемой продукции. Кристаллизатор является одним из наиболее важных функциональных узлов, определяющих рациональную работу МНЛЗ. Он выполняет функцию приема жидкого металла, попадающего в него из промежуточного ковша, а также перевода части жидкой стали в твердое состояние посредством отвода тепла охлаждающей водой [1 – 2].

В кристаллизаторе происходит формообразование заготовки. При образовании корочки металла через стенки медной гильзы кристаллизатора отводится до 30 % тепла от жидкой стали. Образование корочки заготовки и первичная кристаллизация слитка – важнейшая задача, от правильности выполнения которой зависит дальнейшее образование качественной заготовки с заданными параметрами [2, 3].

Применяют два способа подачи жидкого металла в кристаллизаторы – разливка сверху открытой струей и разливка затопленной струей под слой шлака и металла [4]. Исследования показали, что характеры скорост-

ных полей при таких подачах жидкого металла резко отличаются. Хотя наиболее распространенным является второй способ, за рубежом и в России эксплуатируются сортовые кристаллизаторы с использованием открытой струи металла. Одним из распространенных дефектов сортовой заготовки является искажение ее геометрической формы. К ним относится «ромбичность», обусловленная разностью длин диагоналей. Одна из главных причин этого дефекта может быть связана с тем, что ось открытой струи не совпадает с осью кристаллизатора.

Целью работы является создание математической модели и компьютерное моделирование асимметрии роста корочки по периметру и длине гильзы сортового кристаллизатора при смещении открытой струи металла относительно оси кристаллизатора.

Основные размеры сортового кристаллизатора, используемого на ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» при разливке открытой струей металла для получения слитков квадратного сечения $b \times b$, приведены в таблице. В данной работе выбрана декартова система координат, начало которой находится на оси кристаллизатора на уровне поверхности металла, как это показано на рис. 1. Принято, что ось струи смещена

**Основные геометрические размеры
сортового кристаллизатора, мм**

Basic geometric dimensions of section mold, mm

Параметр	Обозначение	Значение
Размер разливаемого квадратного слитка	b	150
Радиус оси кристаллизатора	R	8923
Высота гильзы кристаллизатора	H	900
Диаметр разливочного отверстия	d_0	18
Расстояние от разливочного отверстия до поверхности металла	h_0	1000
Расстояние от оси кристаллизатора на поверхности металла до оси разливочного отверстия	r	$0 - b/4$
Расстояние от верхней границы полости кристаллизатора до поверхности металла	h'	100

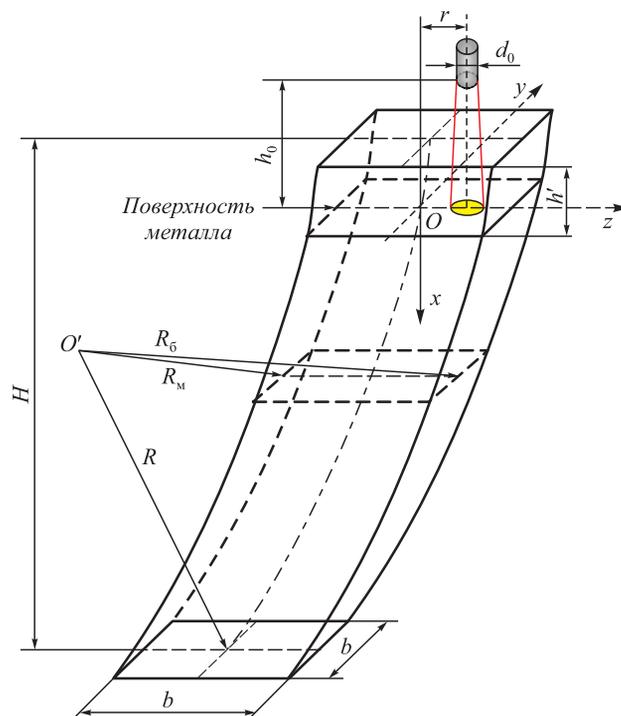


Рис. 1. Основные размеры сортового кристаллизатора при разливке открытой струей металла и выбранная система координат

Fig. 1. Basic dimensions of section mold for casting by open metal jet of and the selected coordinate system

вдоль оси Oz на расстояние r , которое может принимать как положительное, так и отрицательное значение.

Ось кристаллизатора имеет форму дуги окружности радиуса R . Координату произвольной точки $A(x, 0, z_0)$, расположенной на оси кристаллизатора, можно определить как (при $x = 0$ до $H - h'$)

$$z_0(x) = \sqrt{R^2 - \left(\frac{H}{2} - h' - x\right)^2} - \sqrt{R^2 - \left(\frac{H}{2} - h'\right)^2}.$$

Исходя из того, что $b \ll R$, $b \ll R_g$, $b \ll R_m$, можно положить, что левая и правая стенки кристаллизатора имеют координаты $z(x) = z_0(x) - b/2$ и $z = z_0(x) + b/2$ соответственно.

Скорость жидкости на выходе из разливочного отверстия $W_0 = \frac{b^2 v}{15\pi d_0^2}$, м/с. При геометрических параметрах,

приведенных в таблице, и скорости разливки $v = 2,8$ м/мин, имеем $W_0 \approx 4,12$ м/с. Струя, вытекая из круглого отверстия, при свободном падении с высоты h_0 раскрывается, диаметр увеличивается, ее скорость возрастает на $\Delta W_0 = \sqrt{2gh_0} \approx 4,4$ м/с. С учетом этого, жидкий металл встречается с поверхностью расплава со скоростью $u_0 = W_0 + \Delta W_0 \approx 8,52$ м/с.

Под действием струи жидкого металла, протяжки слитка и колебания кристаллизатора возникает движение расплава в кристаллизаторе, вследствие турбулентности развиваются крупномасштабные вихри, которые

приводят к подмыву уже затвердевшей корочки заготовки [5]. Распределение потоков расплава в кристаллизаторе на холодных гидравлических моделях рассмотрено в работах А.А. Скворцова, А.В. Акименко [6], Д.П. Евтева [7], А.В. Лейтеса [8], В.Т. Сладкоштева [9] и других исследователей.

При математическом моделировании движения расплава в кристаллизаторе наиболее простыми являются модели, где в криволинейном замкнутом пространстве радиального кристаллизатора представлено движение металла как раскрытие свободной струи [9]. Действительно, струя расплава попадает в кристаллизатор, где находится жидкий металл такого же химического состава и температуры, поэтому ее можно считать затопленной струей. Кроме этого, двигаясь во внутренней полости кристаллизатора, она является ограниченной струей. Известно, что затопленные струи крайне неустойчивы и, как следствие этого, имеют низкие значения числа Рейнольдса $Re_{кр}$ для перехода от ламинарного режима к турбулентному. Так для круглых затопленных струй критическое значение числа Рейнольдса составляет $Re_{кр} = 3 - 10$, в некоторых случаях это значение может быть увеличено до 290 [10].

В сортовом кристаллизаторе плотность и вязкость жидкой стали будем считать равными $\rho = 7000$ кг/м³ и $\mu = 0,006$ Па·с соответственно. Имеем $Re = u_0 d \frac{\rho}{\mu} \approx 1,78 \cdot 10^5$, где d – диаметр струи на уровне поверхности жидкости в кристаллизаторе, в первом

приближении можно принять $d \approx d_0$. Полученное значение Re говорит о том, что режим течения струи металла, подаваемого в сортовой кристаллизатор, имеет ярко выраженный турбулентный характер.

Рассмотрим течение свободной затопленной турбулентной струи, истекающей из сопла круглого сечения. Обычно длина начального участка принимается равной $L_0 \approx (4,8 \div 6,0)d$. Расстояние от полюса до выходного сечения разливочного отверстия $S_0 \approx 2d$. Диаметры переходного сечения $d_{перех} \approx 3,4d$ и пограничной зоны $d_x = 2(S_0 + x)tg\alpha_2$ [11].

На начальном участке ($x \leq L_0$) скорость на оси струи $u_x = u_0$, а скорость в поперечном сечении начального участка:

- в зоне ядра ($\gamma \leq R_{я.x}$) $u_{x,y} = u_0$;
- в пограничном слое ($R_{я.x} \leq \gamma \leq d_x$) $u_{x,y} = u_0(1 - \bar{\gamma}^{1,5})^2$,

где $\bar{\gamma} = \frac{\gamma - R_{я.x}}{R_x - R_{я.x}}$; $R_{я.x} = (L_0 - x)tg\alpha_1$ – радиус ядра постоянных скоростей в текущем сечении; $R_x = d_x/2$ – радиус струи в рассматриваемом сечении.

На основном участке ($x > L_0$) скорость по оси потока $u_x = \frac{u_0 0,48}{\frac{\alpha x}{d} + 0,145}$, где α – коэффициент, характеризующий турбулизацию потока (для слабо турбулизованного потока принимаем $\alpha = 0,07 - 0,08$). Скорость в поперечном сечении $u_{x,y} = u_x(1 - \bar{\gamma}^{1,5})^2$, где $\bar{\gamma} = \gamma/R_x$, $R_x = d_x/2$.

Приведенные уравнения позволяют определить скорости жидкости для любой точки $A(x, \gamma)$ затопленной струи. При смещении оси струи вдоль оси Oz поля скоростей жидкости будут зеркально симметричны относительно плоскости Ozx (см. рис. 1).

При заданном смещении струи металла на величину r от оси кристаллизатора определим расстояние от оси струи:

- до задней (передней) стенки [при $z_0(x) - b/2 \leq z \leq z_0(x) + b/2$]

$$\gamma(x, z, r) = \sqrt{\left(\pm \frac{b}{2}\right)^2 + (z + z_0(x) - r)^2};$$

- до левой стенки [при $-b/2 \leq y \leq z_0(x)$]

$$\gamma(x, y, r) = \sqrt{y^2 + \left(z_0(x) - \frac{b}{2} - r\right)^2};$$

- до правой стенки [при $-b/2 \leq y \leq z_0(x)$]

$$\gamma(x, y, r) = \sqrt{y^2 + \left(z_0(x) + \frac{b}{2} - r\right)^2}.$$

Известно, что поля скоростей в поперечных сечениях внутри ограничивающих стенок и соответствующих сечениях свободной струи (если речь идет не о ско-

рости непосредственно у стенки) в известной степени аналогичны [12]. В ограниченном пространстве поле скоростей соответствует полю скоростей в центральной части свободной струи. Это является следствием общности законов турбулентного перемешивания и существенно облегчает расчет поля скоростей в кристаллизаторе, хотя делает его сильно приближенным.

Авторы ряда работ [3, 6] отмечают, что локальные скорости потока у стенок кристаллизатора составляют 5 – 10 см/с, другие – до 60 – 120 см/с, причем подплавление твердой корочки происходит лишь в том случае, если скорость потока, омывающего фронт кристаллизации, превышает некоторое предельное значение.

Наиболее часто при моделировании роста корочки слитка используется эмпирический закон распределения теплового потока по высоте кристаллизатора, например в работах [13 – 15]. Более точный анализ условий взаимодействия потока перегретого расплава с фронтом кристаллизации описан в работе [3]. Традиционная постановка задачи о течении жидкости вдоль твердой стенки основывается на использовании граничного условия прилипания ($v(y) = 0$ при $y = 0$). В исследуемой задаче пограничный слой граничит с двухфазной зоной, образованной растущими кристаллами и расплавом с повышенной вязкостью, заполняющим пространство между ними. В связи с этим предполагается, что определенная часть двухфазной зоны (размером l^*) вовлекается в движение. На границе двухфазной зоны принимается условие (при $y = 0$) $v + l^* \left(\frac{dv}{dy}\right) = 0$.

Распределение скорости по толщине слоя размером l^* полагаем линейным $v = v^* \left(1 - \frac{y_1}{l^*}\right)$ при $0 \leq y_1 \leq l^*$. Координата y_1 отсчитывается от границы пограничного слоя ($y = 0$) сверху вниз, так что $v = 0$ при $y_1 = l^*$.

В работе [3] получена усредненная плотность теплового потока $q_l(x)$ на некотором отрезке протяженностью b_0

$$\bar{q}_l = \frac{4\lambda\Delta T}{b_0\sqrt{30}}(1 + 1,5\eta)^{0,5}\overline{Re}^{0,5}\overline{Pr}^{1/3}, \quad (1)$$

где $\overline{Re} = \frac{v_0 b_0 \rho}{\mu}$; $\Delta T = T_{ж} - T_{л}$ – перегрев стали, $T_{л}$ – температура ликвидуса; $\overline{Pr} = 0,10 - 0,25$ – число Прандтля жидкой стали; $\lambda = 22$ Вт/(м·град) – коэффициент теплопроводности жидкой стали; v_0 – скорость течения на внешней границе пограничного слоя.

Оценить протяженность участка b_0 можно, исходя из предположения, что стабилизация пограничного слоя происходит на участке, в 15 – 20 раз превышающем толщину пограничного слоя, которая обычно составляет несколько миллиметров.

При помощи параметра $\eta = v^*/v_0$ учитывается наличие двухфазной зоны и частичное вовлечение потока в

пространство между ветвями дендритов. Этот параметр тем больше, чем больше разветвленность дендритов на фронте кристаллизации. Так при гладком фронте $\eta = 0$, при реальной ситуации кристаллизации стали $\eta \approx 0,25$.

При составлении модели роста корочки в кристаллизаторе считали, что температурная граница между зонами жидкой и твердой стали плоская, т. е. двухфазная зона отсутствует и затвердевание металла происходит по модели Стефана. Тогда на межфазной границе $\rho L \frac{d\delta}{d\tau} = q_{кр} - q_l$, где $q_{кр}$ – тепловой поток, поглощаемый стенкой кристаллизатора. Это выражение можно записать в зависимости от вертикальной координаты с учетом $v = dx/d\tau$ как

$$\rho L v \frac{d\delta}{dx} = q_{кр}(x) - q_l, \quad (2)$$

где δ – толщина слоя затвердевшего металла; τ – продолжительность затвердевания слоя металла.

Примем допущение, что тепловой поток, отбираемый стенкой кристаллизатора, не зависит от небольших смещений струи относительно оси кристаллизатора. Будем полагать, что базовый вариант разливки – это разливка, при которой оси кристаллизатора и струи совпадают. В этом случае корочка растет по закону квадратного корня $\delta = k\sqrt{\tau}$, где $k = 2,7 - 3,3$ мм/с^{0,5} – коэффициент затвердевания стали.

При смещении струи на величину r (вдоль оси Oz) меняется распределение скоростей вблизи внутренней поверхности кристаллизующейся заготовки, а значит и тепловые потоки q_l . Тогда изменение толщины корочки по сравнению с базовой ее толщиной будет определяться уравнением

$$\rho L v \frac{d\delta}{dx} = \Delta q_l, \quad (3)$$

где $\Delta q_l = q_l|_{r=0} - q_l|_{r \neq 0}$ – изменение локального теплового потока в кристаллизаторе по сравнению с базовым вариантом.

Решая дифференциальное уравнение (3) при начальном условии $\delta(0) = 0$, получаем изменение толщина корочки по сравнению с базовым вариантом при смещении струи на величину r в точке с координатой X

$$\Delta\delta(X) = \frac{1}{\rho L v} \int_0^X \Delta q_l dx. \quad (4)$$

Таким образом, предлагаемый алгоритм решения задачи сводится к нахождению скорости жидкого металла вдоль корочки, когда ось струи не совпадает с осью кристаллизатора и может быть смещена в горизонтальном направлении на величину r . Далее находятся тепловые потоки на поверхности кристаллизующегося слитка по уравнению (1) и наконец – изменение толщины корочки по сравнению с базовой толщиной по уравнению (4).

Для нахождения распределения скоростей жидкой стали, теплового потока и изменения роста корочки по внутренней поверхности кристаллизатора создана компьютерная программа «Рост корочки слитка» в среде разработки Mathcad 14. С ее использованием проведено моделирование изменения толщины корочки по высоте и периметру кристаллизатора (по сравнению с базовым вариантом) при смещении струи на величину r . Исходные данные для моделирования были выбраны из таблицы, температура перегрева металла $\Delta T = 20$ °С, коэффициент затвердевания стали $k = 3,0$ мм/с^{0,5}.

На рис. 2 показано изменение роста корочки по высоте кристаллизатора по оси задней, левой и правой стенок при смещении разливочной струи на ± 40 мм. Положительные значения говорят о том, что корочка растет, а отрицательные – уменьшается по сравнению с базовым вариантом. Видно, что качественное поведение кривых $\Delta\delta(X)$ на левой и правой стенке кристаллизатора одинаковое, если поменять местами кривые 1 на 2, но есть и количественное различие, связанное с его кривизной.

На рис. 3 показаны результаты моделирования изменения роста корочки по периметру кристаллизатора на

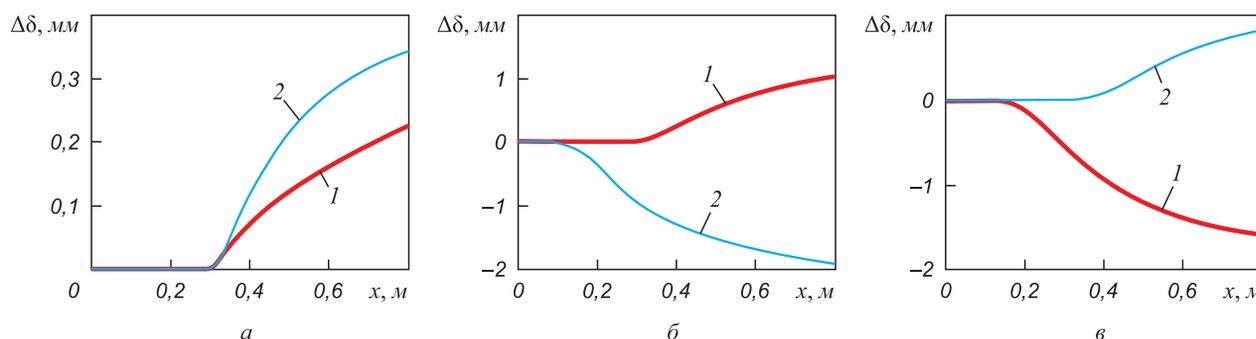


Рис. 2. Изменение толщины корочки по сравнению с базовым вариантом по высоте кристаллизатора при смещении разливочной струи: а – на задней стенке ($z = 0$); б – на левой стенке ($y = 0$); в – на правой стенке ($y = 0$); 1 – $r = 40$ мм; 2 – $r = -40$ мм

Fig. 2. Change in the thickness of the crust compared to the basic case of the displacement of casting jet along the mold height: а – on the back wall ($z = 0$); б – on the left wall ($y = 0$); в – on the right wall ($y = 0$); 1 – $r = 40$ mm; 2 – $r = -40$ mm

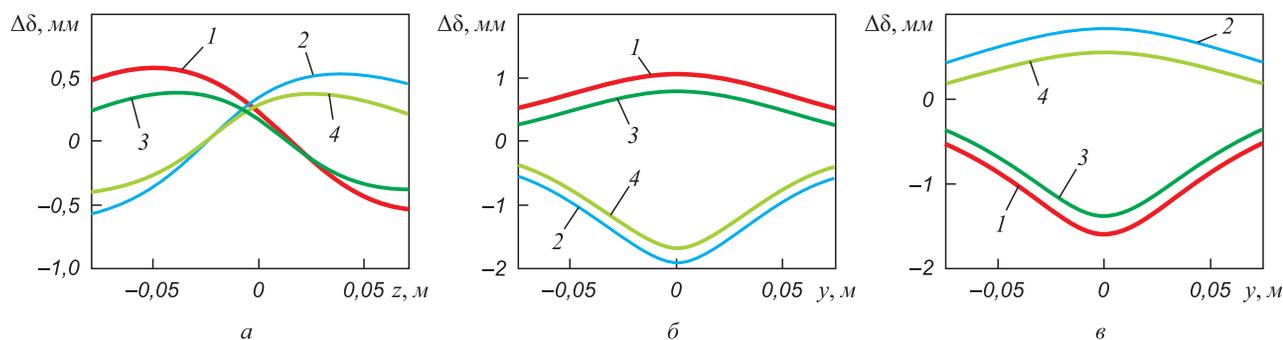


Рис. 3. Изменение толщины корочки по сравнению с базовым вариантом по периметру кристаллизатора:

a – на задней стенке $\left(-\frac{b}{2} + z_0(x) \leq z \leq \frac{b}{2} + z_0(x)\right)$; *б* – на левой стенке $\left(-\frac{b}{2} \leq y \leq \frac{b}{2}\right)$; *в* – на правой стенке $\left(-\frac{b}{2} \leq y \leq \frac{b}{2}\right)$;
 1 – $r = 40$ мм, $x = 0,8$ м; 2 – $r = -40$ мм, $x = 0,8$ м; 3 – $r = 40$ мм, $x = 0,6$ м; 4 – $r = -40$ мм, $x = 0,6$ м

Fig. 3. Change in the thickness of the crust compared to the basic case along the mold perimeter:

a – on the back wall $\left(-\frac{b}{2} + z_0(x) \leq z \leq \frac{b}{2} + z_0(x)\right)$; *б* – on the left wall $\left(-\frac{b}{2} \leq y \leq \frac{b}{2}\right)$; *в* – on the right wall $\left(-\frac{b}{2} \leq y \leq \frac{b}{2}\right)$;
 1 – $r = 40$ mm, $x = 0,8$ m; 2 – $r = -40$ mm, $x = 0,8$ m; 3 – $r = 40$ mm, $x = 0,6$ m; 4 – $r = -40$ mm, $x = 0,6$ m

расстоянии 0,6 и 0,8 м от лунки. Рассматривалось смещение разливочной струи на ± 40 мм от базового варианта. Видно, что на задней стенке изменение толщины корочки в каких-то местах больше нуля, т. е. она растет, а в других меньше нуля и она уменьшается. Есть и такие области, где изменения толщины корочки по сравнению с базовым вариантом практически нет. На левой и правой стенке кристаллизатора такого не наблюдается и во всех точках стенки $\Delta\delta$ больше или меньше нуля.

Адекватность созданной модели может быть проверена в дальнейшем на основе обработки экспериментальных данных асимметрии роста корочки для рассматриваемого сортового кристаллизатора.

Выводы. Составлена математическая модель для нахождения характера движения расплава во внутренней полости сортового кристаллизатора, а также скорости движения металла вблизи затвердевающей корочки на основе теории свободной и ограниченной затопленной струи.

Предложены математическая модель и компьютерная программа, позволяющие определять роль смещения оси разливочной струи для нахождения изменения толщины корочки слитка по высоте кристаллизатора на разных его поверхностях и толщины корочки слитка на выходе из кристаллизатора по его периметру.

Проведено компьютерное моделирование асимметрии роста корочки по периметру и длине сортового кристаллизатора квадратного сечения 150×150 . Установлено, что горизонтальное смещение оси открытой струи металла на 40 мм может приводить к локальному изменению толщины корочки на выходе из кристаллизатора на левой стенке до 2 мм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вдовин К.Н., Точилкин В.В., Ячиков И.М. Непрерывная разливка стали. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2012. – 540 с.

2. Непрерывная разливка стали. Расчеты медных кристаллизаторов / И.М. Ячиков, К.Н. Вдовин, В.В. Точилкин и др. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2014. – 190 с.
 3. Тепловые процессы при непрерывном литье стали / Ю.А. Самойлович, С.А. Крулевецкий, В.А. Горяинов, З.К. Кабаков. – М.: Металлургия, 1982. – 152 с.
 4. Непрерывная разливка стали в сортовые заготовки / В.С. Рутес, Н.Н. Гуглин, Д.П. Евтеев и др. – М.: Металлургия, 1967. – 144 с.
 5. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Современные технологии разливки и кристаллизации сплавов. – М.: Машиностроение, 1998. – 360 с.
 6. Скворцов А.А., Акименко А.Д., Ульянов В.А. Влияние внешних воздействий на процесс формирования слитков и заготовок. – М.: Металлургия, 1991. – 216 с.
 7. Евтеев Д.П., Колыбалов И.Н. Непрерывное литье стали. – М.: Металлургия, 1984. – 198 с.
 8. Лейтес А.В. Защита стали в процессе непрерывной разливки. – М.: Металлургия, 1984. – 200 с.
 9. Непрерывная разливка стали на радиальных установках / В.Т. Сладкошестев, Р.В. Потанин, О.Н. Суладзе и др. – М.: Металлургия, 1974. – 288 с.
 10. Леманов В.В., Терехов В.И., Шаров К.А., Шумейко А.А. Экспериментальное исследование затопленных струй при низких числах Рейнольдса // Письма в журнал технической физики. 2013. Т. 39. Вып. 9. С. 34 – 40.
 11. Шатихина Т.А. Гидрогазодинамика: Учеб. пособие. – Ростов н/Д: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2009. – 191 с.
 12. Идельчик И.Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов. (Подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов). – М.: Машиностроение, 1983. – 351 с.
 13. Vdovin K.N., Larina T.P., Yachikov I.M., Pozin A.E. Simulation of slab solidification in the mold of a continuous-casting machine // Steel in Translation. 2011. Vol. 41. No 2. P. 105 – 108.
 14. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет / Под общ. ред. Г.А. Шалаева. – Екатеринбург: Уральский центр ИП и рекламы – «Марат», 2003. – 320 с.
 15. Кабаков З.К., Сухарев Р.В., Габелая Д.И. Моделирование тепловых процессов в системе «кристаллизатор-слиток» // Металлург. 2007. № 3. С. 58 – 60.

Поступила 15 октября 2015 г.

MODELING OF THE GROWTH OF METAL CRUST OF SECTION MOLD DURING DISPLACEMENT OF THE JET RELATIVE TO THE AXIS

I.M. Yachikov¹, K.N. Vdovin¹, O.A. Marochkin²,
Vas.V. Tochilkin¹

¹ Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov,
Magnitogorsk, Russia

² LLC “Introduction of new technologies and equipment”

Abstract. A mathematical model for finding the nature of the liquid metal motion in the section mold and its speed near the solidifying crust was made on the basis of the theory of free and limited submerged jet. The authors have selected the mathematical model to determine the heat flux when moving superheated liquid steel at a predetermined speed along the two-phase boundary. Therefore, the mathematical model was proposed to find the changes in the thickness of the ingot crust along the height of profiled square mold on different surfaces and in its output around its perimeter with a horizontal displacement of the axis of the jet of the metal fed into the mold. Computer modeling of the asymmetry of crust growth along the perimeter and the height of the shell of the section mold with square section of 150×150 was made at the displacement of axis of the open metal jet. It was established that the horizontal displacement of the axis of the metal open jet of 40 mm may lead to a local change in thickness of the crust at the outlet of the mold on the left side up to 2 mm.

Keywords: continuous casting machine, section mold, Stephen’s metal crust model, two-phase boundary, metal jet, mathematical model.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-1-24-29

REFERENCES

1. Vdovin K.N., Tochilkin V.V., Yachikov I.M. *Nepreryvnaya razlivka stali* [Continuous casting of steel]: Magnitogorsk: Izd-vo MGTU, 2012, 540 p. (In Russ.).
2. Yachikov I.M., Vdovin K.N., Tochilkin V.V. etc. *Nepreryvnaya razlivka stali. Raschety mednykh kristallizatorov* [Continuous casting of steel. Calculations of copper molds]: Magnitogorsk: Izd-vo MGTU im. G.I. Nosova. 2014, 190 p. (In Russ.).
3. Samoilovich Yu.A., Krulevskii S.A., Goryainov V.A., Kabakov Z.K. *Teplovy protsessy pri nepreryvnom lit’e stali* [Thermal processes at continuous casting of steel]. Moscow: Metallurgiya, 1982, 152 p. (In Russ.).
4. Rutes V.S., Guglin N.N., Evteev D.P. etc. *Nepreryvnaya razlivka stali v sortovye zagotovki* [Continuous casting of steel into billets]. Moscow: Metallurgiya, 1967, 144 p. (In Russ.).
5. Efimov V.A., El’darkhanov A.S. *Sovremennye tekhnologii razlivki i kristallizatsii splavov* [Modern technologies of casting and crystallization of alloys]. Moscow: Mashinostroenie, 1998, 360 p. (In Russ.).
6. Skvortsov A.A., Akimenko A.D., Ul’yanov V.A. *Vliyaniye vneshnikh vozddeystviy na protsess formirovaniya slitkov i zagotovok* [Influence of external impacts on formation process of ingots and billets]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 216 p. (In Russ.).
7. Evteev D.P., Kolybalov I.N. *Nepreryvnoe lit’e stali* [Continuous casting of steel]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 198 p. (In Russ.).
8. Leites A.V. *Zashchita stali v protsesse nepreryvnoi razlivki* [Protection of steel during continuous casting]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 200 p. (In Russ.).
9. Sladkoshtelev V.T., Potanin R.V., Suladze O.N. etc. *Nepreryvnaya razlivka stali na radial’nykh ustanovkakh* [Continuous casting of steel on the radial installations]. Moscow: Metallurgiya, 1974, 288 p. (In Russ.).
10. Lemanov V.V., Terekhov V.I., Sharov K.A., Shumeiko A.A. Experimental research of the flooded jets at the subzero numbers of Reynolds. *Pis’ma v ZhTF*. 2013, vol 39, Issue 9, pp. 34–40. (In Russ.).
11. Shatikhina T.A. *Gidrogazodinamika* [Hydraulic gas dynamics]. Rostov-on-Don: RGUPS, 2009, 191 p. (In Russ.).
12. Idel’chik I.E. *Aerogidrodinamika tekhnologicheskikh apparatov. (Podvod, otvod i raspredelenie potoka po secheniyu apparatov)* [Aerohydrodynamics of technological devices (Supply, transfer and distribution of jet along the sections of devices)]. Moscow: Mashinostroenie, 1983, 351 p. (In Russ.).
13. Vdovin K.N., Larina T.P., Yachikov I.M., Pozin A.E. Simulation of slab solidification in the mold of a continuous-casting machine. *Steel in Translation*. 2011, vol. 41, no. 2, pp. 105–108.
14. *Mashiny nepreryvnogo lit’ya zagotovok. Teoriya i raschet* [CCM. Theory and calculation]. Shalaev G.A. ed. Ekaterinburg: Ural’skii tsentr PR i reklamy “Marat”, 2003, 320 p. (In Russ.).
15. Kabakov Z.K., Sukharev R.V., Gabelaya D.I. Modeling thermal processes in the mold-ingot system. *Metallurgist*. 2007, vol. 51, no. 3, pp. 159–164.

Information about the authors:

I.M. Yachikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Computer Engineering, and Applied Mathematics (jachikov@mail.ru)

K.N. Vdovin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Materials Science and Foundry”

O.A. Marochkin, Technical Expert

V.V. Tochilkin, Postgraduate of the Chair “Materials Science and Foundry”

Received October 15, 2015