

УДК 519:669.27

## КЛЕТОЧНО-АВТОМАТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ РАЗЛИВКИ НА РОСТ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ КРУГЛОГО СЛИТКА ВНУТРИ КРИСТАЛЛИЗАТОРА

Докт. физ.-мат. наук, проф. ЧИЧКО А. Н., канд. техн. наук МАТОЧКИН В. А.,  
докт. техн. наук, проф. СОБОЛЕВ В. Ф., инж. ДЕМИН А. В.,  
канд. техн. наук ЧИЧКО О. И.

*Белорусский национальный технический университет,  
РУП «Белорусский металлургический завод»*

При производстве слитков важнейшей задачей является оптимизация процесса вытяжки, что позволяет существенно снижать энергозатраты в металлургическом производстве. Особенно остро проблема энергосбережения может стоять при разработке технологического процесса для слитков новых сечений, а это требует проведения исследовательской работы. Сокращения энергозатрат и времени на разработку новых технологических процессов можно достичь, используя методы компьютерного моделирования, актуальность которых вызвана разворачивающейся на РУП «БМЗ» подготовкой производства трубных заготовок из низкоуглеродистых марок сталей типа Ст20. Важнейшей задачей при получении круглой заготовки являются моделирование и расчет толщины корки слитка в процессе его движения в кристаллизаторе. От динамики изменения корки слитка в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) зависят уровень напряжений и возможность образования многих дефектов. К тому же снижение толщины корки слитка до критических размеров в кристаллизаторе может стать причиной аварийных ситуаций в МНЛЗ, что необходимо учитывать при разработке технологического процесса.

Существующие методы расчета толщины твердой корки при кристаллизации слитка основываются на упрощенном законе квадратного корня. Однако последний не учитывает ряд особенностей кристаллизации, в частности связанных с размером и пространственной кристаллизацией слитка, а также с изменениями в охлаждении во времени, которые происходят при прохождении слитком зоны вторичного охлаждения. Развитие ма-

тематического моделирования и компьютерных технологий позволяет рассчитывать толщину корки, учитывая особенности кристаллизации слитка в объеме.

Цель настоящей работы – численное моделирование динамики изменения толщины корки круглого слитка на основе клеточно-автоматного подхода для различных вариантов круглого сечения слитков, которые могут быть получены в условиях оборудования РУП «БМЗ».

Известно, что распределение температур при кристаллизации слитка методом непрерывной разливки в значительной степени определяет качество слитка. Внутренние дефекты слитка – усадочная раковина, различные виды ликвационных дефектов, осевая пористость, продольные и поперечные трещины – зависят от распределения температур как по длине, так и по поперечному сечению. В то же время температура разливки, скорость вытягивания, коэффициенты теплоотдачи в кристаллизаторе, зона вторичного охлаждения, поперечный размер слитка определяют распределение температур. На характер температурного поля оказывает влияние и ликвация углерода, от которой зависит температура ликвидуса, что также влияет на температурное поле слитка. Кристаллизация слитка существенно влияет на температурное поле слитка, которое многие исследователи игнорируют, а это может вносить немалые погрешности в расчеты температур. В связи с изложенным выше представляет практический интерес моделирование температурного поля слитка в условиях кристаллизации, сопровождающейся изменением соотношения твердой и жидкой фаз.

В качестве основного уравнения математической модели для расчета температур использовали методы [1–5], основанные на дифференциальном уравнении теплопроводности:

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

где

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

$T$  – температура в точках  $x, y, z$  слитка;  $T_{cp}$  – температура внешней среды (постоянная величина, равная 25 °С);  $\tau_i$  – время;  $\lambda(T)$  – коэффициент теплопроводности материала при температуре  $T$ ;  $c(T)$  – удельная теплоемкость материала при температуре  $T$ ;  $\rho_{sol}$  – плотность твердой фазы;  $\rho_{lic}$  – плотность жидкой фазы;  $\rho = \rho_{sol} + \rho_{lic}$  – относительная плотность материала;  $x, y, z$  – декартовы координаты;  $Q_{кр}$  – удельная теплота кристаллизации металла;  $k$  – коэффициент теплоотдачи поверхности металла в охлаждающую среду;  $\Omega_M$  – пространство точек металла;  $\Omega_{M-cp}$  – то же границы металл – среда.

Определение  $T(\tau)$  из (1) осуществляли на основе конечно-разностной схемы, при которой объем моделируемого пространства  $380 \times 330 \times 20000$  мм был разбит на элементы прямоугольной формы с длиной  $\Delta x = 10$  мм, шириной  $\Delta z = 10$  мм и высотой  $\Delta y = 20$  мм. Приращение температуры в одном элементе определялось через интервал времени  $\Delta t = 0,08$  с. Процесс образования твердой фазы моделировался как увеличение плотности твердой и уменьшение плотности жидкой фаз в точках пространства с каждым тактом моделирования. В процессе виртуальной разливки заготовка перемещается равномерно сверху вниз с заданной скоростью. Перемещение моделируется копированием соседних элементов из верхнего ряда в нижний, начиная с самых нижних пар моделируемого пространства. Кроме того, копирование осуществляется через интервал модельного времени, соответствующий скорости разливки, если скорость разливки равна  $0,75$  м/мин =  $0,0125$  м/с, то шаг моделируемого пространства равен  $0,02$  м. Шаг времени для моделирования процесса охлаждения равен  $0,08$  с, если на один такт перемещения приходится  $0,02 / (0,08 \cdot 0,0125) = 20$  тактов теплового процесса.

Для расчета толщины корки использовали приведенные выше математические модели. Рассмотрим поперечное сечение слитка на выходе из кристаллизатора (Б-Б, рис. 1). Площадь этого сечения:  $S_{ls} = \pi d^2 / 4$ , где  $d$  – диаметр слитка. Площадь, занятая жидкой фазой:  $S_l = \pi (d/2 - s)^2$ , где  $s$  – искомая толщина слоя твердой фазы.

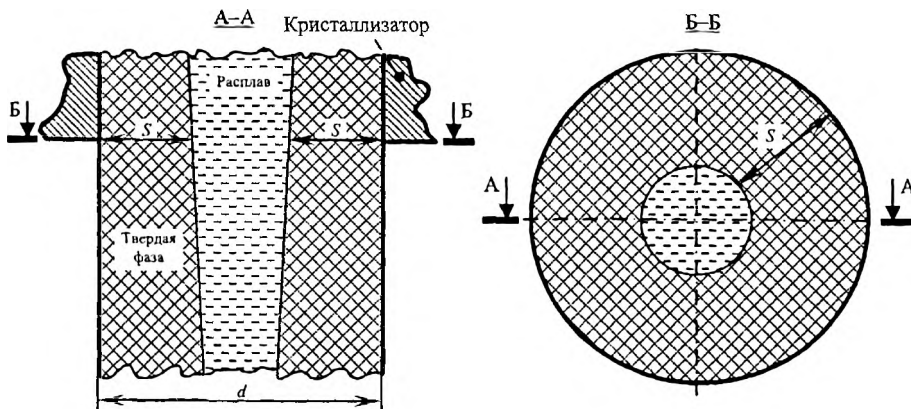


Рис. 1. Схема изменения толщины слоя твердой фазы на выходе из кристаллизатора

Тогда имеет место соотношение

$$\frac{S_l}{S_{ls}} = \frac{\iint_{y=h} \rho_{\text{lic}}(x, y, z) dx dz}{\iint_{y=h} \rho_{\text{lic}}(x, y, z) + \rho_{\text{sol}}(x, y, z) dx dz}, \quad (3)$$

где  $h$  – координата выхода кристаллизатора.

Подставив в соотношение (3) выражения для площадей и перейдя к дискретной форме, получим

$$\frac{(d/2 - s)^2}{d^2/4} = \frac{\sum_{i,k} \rho_{\text{лн}}(x_i, h, z_k)}{\sum_{i,k} (\rho_{\text{лн}}(x_i, h, z_k) + \rho_{\text{сол}}(x_i, h, z_k))}. \quad (4)$$

Откуда выражение толщины слоя твердой фазы

$$s = \frac{d}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i,k} \rho_{\text{лн}}(x_i, h, z_k)}{\sum_{i,k} (\rho_{\text{лн}}(x_i, h, z_k) + \rho_{\text{сол}}(x_i, h, z_k))}} \right). \quad (5)$$

На основе представленного метода была разработана программа, по которой проведены исследования влияния скорости вытяжки, температуры заливки, коэффициента теплоотвода в кристаллизаторе на толщину затвердевающей корки. При проведении исследований учитывали три уровня скоростей вытяжки круглого слитка:  $v = 2,5; 3,0; 3,5$  м/мин на МНЛЗ-1, используемой на БМЗ. Линейные размеры кристаллизатора и трех зон вторичного охлаждения по направлению вытяжки слитка соответственно составляли: 0,780; 0,130; 1,440; 2,520 м. В качестве материала слитка использовали стали: Ст20, 40Х, ШХ15СГ. Каждой из сталей соответствовало два уровня температуры заливки. Коэффициент теплоотвода в кристаллизаторе  $K_{\text{кр}} = 2400$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Все расчеты проводились для заготовок диаметрами  $d = 80; 100; 140$  мм.

На рис. 2а представлена рассчитанная зависимость толщины корки в кристаллизаторе от скоростей вытяжки круглой заготовки диаметром  $d = 80$  мм для стали Ст20. Как видно из рисунка, толщина корки в кристаллизаторе уменьшается с увеличением скорости движения слитка. В результате расчетов установлено, что для круглой заготовки диаметром  $d = 80$  мм изменение скорости вытяжки с  $v = 2,5$  м/мин до  $v = 3,5$  м/мин приводит к уменьшению толщины корки на 29 % при температуре заливки  $T = 1560$  °С. Аналогичные изменения в толщине корки происходят при температуре заливки  $T = 1550$  °С. На рис. 2б представлена рассчитанная зависимость толщины корки в кристаллизаторе от скоростей вытяжки круглой заготовки диаметром  $d = 100$  мм для стали Ст20. Как видно из рисунка, толщина корки в кристаллизаторе уменьшается с увеличением скорости движения слитка. В результате расчетов установлено, что изменение скорости вытяжки от  $v = 2,5$  м/мин до  $v = 3,5$  м/мин приводит к уменьшению толщины корки на 30 % при температуре заливки  $T = 1560$  °С. Эти изменения аналогичны изменениям в толщине корки, представленным на рис. 2а. Из этого можно сделать вывод, что диаметр заготовки в интервале от 80 до 100 мм для МНЛЗ-1 практически не влияет на динамику роста твердой корки в кристаллизаторе. Увеличение диаметра заготовки от 100 до 140 мм также слабо влияет на динамику роста твердой корки.

Были проведены расчеты толщины корки в кристаллизаторе для стали 40Х, которые показали, что толщина корки в кристаллизаторе также уменьшается с увеличением скорости движения слитка. В результате расчетов установлено, что для круглой заготовки диаметром 80 мм изменение скорости вытяжки от 2,5 до 3,5 м/мин приводит к уменьшению толщины корки на 26 % при температуре заливки  $T = 1530$  °С. Аналогичные изменения зависимости толщины слоя корки происходят на выходе из кристаллизатора для заготовок диаметрами 100 и 140 мм при температуре заливки 1530 и 1520 °С. То есть тенденция к снижению толщины корки с увеличением скорости перемещения слитка сохраняется.

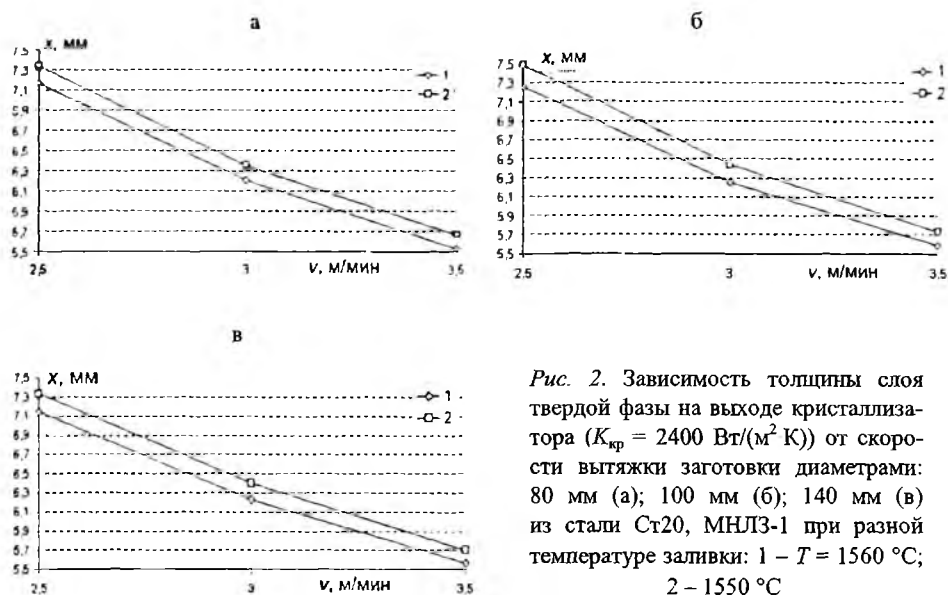


Рис. 2. Зависимость толщины слоя твердой фазы на выходе кристаллизатора ( $K_{кр} = 2400$  Вт/(м<sup>2</sup> К)) от скорости вытяжки заготовки диаметрами: 80 мм (а); 100 мм (б); 140 мм (в) из стали Ст20, МНЛЗ-1 при разной температуре заливки: 1 –  $T = 1560$  °С; 2 –  $1550$  °С

При расчете зависимости образования толщины корки в кристаллизаторе от скоростей вытяжки круглой заготовки для стали ШХ15СГ установлено, что толщина корки в кристаллизаторе также уменьшается с увеличением скорости движения слитка. Для круглой заготовки диаметром 80 мм изменение скорости вытяжки от 2,5 до 3,5 м/мин приводит к уменьшению толщины корки на 31 % при температуре заливки  $T = 1460$  °С. Аналогичные изменения в толщине корки происходят при температуре заливки  $T = 1450$  °С. Установлено, что для круглой заготовки диаметром  $d = 140$  мм изменение скорости вытяжки от 2,5 до 3,5 м/мин приводит к уменьшению корки на 30 % при температуре заливки  $T = 1460$  °С и теплоотводе в кристаллизаторе  $K_{кр} = 2400$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), а для круглой заготовки диаметром 100 мм – на 31 %.

## ВЫВОДЫ

1. Показано, что толщина слоя твердой фазы, образующейся в кристаллизаторе при разливке круглого слитка, не зависит от диаметра круглой заготовки и температуры заливки стали.

2. Установлено, что для круглого слитка, получаемого из стали 40Х, характерны меньшие толщины корок при одинаковых условиях охлаждения, чем для слитков из сталей Ст20 и ШХ15СГ. Причиной этих закономерностей являются различия в теплофизических свойствах сталей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Моделирование влияния охлаждаемых и неохлаждаемых роликов на температуры и напряжения поверхности промышленного слитка в зоне вторичного охлаждения / А. Н. Чичко, Д. М. Кукуй, Н. В. Андрианов и др. // *Литье и металлургия*. – 2003. – № 3. – С. 131–138.
2. Компьютерная система «ПроНРС» и трехмерное моделирование распределения температур, напряжений и углерода в процессе непрерывной разливки стали / А. Н. Чичко, Д. М. Кукуй, В. Ф. Соболев и др. // *Литье и металлургия*. – 2002. – № 3. – С. 21–27.
3. О методах компьютерного анализа напряжений и деформаций трехмерной детали, подвергнутой термической обработке / О. И. Чичко, В. Ф. Соболев, Г. А. Анисович, А. Н. Чичко // *Вести НАН Беларуси*. – 2002. – № 4. – С. 24–29.
4. Численные расчеты температур и напряжений в кристаллизующемся слитке из стали 20ХНЗА размером 300×400 мм для различных условий охлаждения / А. Н. Чичко, Н. В. Андрианов, А. В. Демин и др. // *Литье и металлургия*. – 2004. – № 3. – С. 131–135.
5. Компьютерное моделирование на основе программы «ПроНРС-2» продольных напряжений в слитке, охлаждаемом плоскофакельными форсунками / А. Н. Чичко, Н. В. Андрианов, А. В. Демин и др. // *Литье и металлургия*. – 2004. – № 2. – С. 10–18.

Представлена кафедрой  
машин и технологий  
литейного производства

Поступила 5.01.2006

УДК 621.64:643

### **АНАЛИЗ ДАННЫХ СИСТЕМЫ УЧЕТА И АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПЯТИ- И БОЛЕЕ ЭТАЖНЫХ ЖИЛЫХ ДОМОВ**

Канд. техн. наук, доц. ЛАТЫШОВ Ф. Р., инж. МАМАЕВ И. Р.

*Уфимский государственный институт сервиса*

Регулирование теплоснабжения жилых домов с использованием автоматических регуляторов – тема не новая в отечественной теплотехнической литературе. Апробация и исследование различных автоматических систем централизованного теплоснабжения началось в СССР в 1997 г. [1], а периодическое выборочное внедрение этих систем происходило в 1973–1978, 1982–1989 гг. [2].