

На правах рукописи

Повитухин Сергей Алексеевич

**Математическое моделирование затвердевания заготовки
в кристаллизаторе машины непрерывного литья при разливке под
шлаком**

Специальность 05.13.18
Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный университет»

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Вдовин Константин Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Панферов Владимир Иванович

доктор технических наук,
профессор Логунова Оксана Сергеевна

Ведущая организация – ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина» (Уральский государственный
технический университет - УПИ)

Защита диссертации состоится 05 мая 2010 г. в 12 ч. 00 мин. на заседании
диссертационного совета Д 212.298.14 при Южно–Уральском государственном
университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно–Уральского государственного университета.

Автореферат разослан 31 марта 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Л. Б. Соколинский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования.

В процессе непрерывной разливки жидкий металл заливают в интенсивно охлаждаемую сквозную форму – кристаллизатор. Его назначение состоит в формировании поверхностной корочки слитка и профиля заготовки. В непрерывной разливке шлак используют для смазки при трении слитка о стенки кристаллизатора и тепловой изоляции слитка. В основе математической модели должна лежать начально-краевая задача Стефана для уравнения теплопроводности. Анализ литературных источников показал, что при рассмотрении процессов, происходящих в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), используются следующие упрощения:

1. рассматриваются плоскопараллельные стационарные модели;
2. на поверхностях слитка и кристаллизатора задаются либо коэффициенты теплопередачи по высоте стенки, либо величина теплового потока.

Математическая модель должна учитывать информацию о температурах ребер слитка как зон наибольшего градиента температур по всей высоте кристаллизатора. Следовательно, для адекватного описания процесса образования слитка в кристаллизаторе надо решать пространственную задачу. При решении стационарной задачи возникает проблема в выборе начальной формы корочки слитка, которая существенно повлияет на решение задачи. Второе упрощение вводит в задачу трудноопределимые характеристики. В результате математическая модель будет давать большие погрешности. Для устранения этого недостатка необходимо решать контактную задачу, то есть задачу, рассматривающую процессы, как в кристаллизаторе, так и в слитке.

Таким образом, возникает потребность в разработке нестационарной пространственной математической модели, которая описывает тепловые и фазовые процессы в заготовке и кристаллизаторе МНЛЗ с допустимой погрешностью. В связи с этим проведенное исследование является *актуальным*.

Целью работы является: создание контактной нестационарной пространственной математической модели, описывающей производство непрерывно–литых заготовок, при разливке под шлаком; создание пакета программ, позволяющих моделировать процесс производства заготовок в МНЛЗ; изучение влияния различных факторов на качество слитка и производительность МНЛЗ; определение рациональных теплотехнических режимов литья заготовок с целью повышения качества поверхности слитка и производительности МНЛЗ.

Задачи, которые необходимо решить для достижения цели:

1. Разработать нестационарную трехмерную контактную математическую модель затвердевания слитка в кристаллизаторе МНЛЗ.
2. Используя экспериментальные данные, апробировать разработанную математическую модель на адекватность.
3. Изучить влияние различных факторов на температурные поля в слитке и стенке кристаллизатора.

4. На основе построенной математической модели обосновать выбор наилучших теплотехнических режимов литья непрерывно–литых заготовок.

Методика исследований. При выполнении диссертационного исследования использованы: численные методы линейной алгебры и математического анализа, метод конечных элементов и конечно–разностный метод. Достоверность полученных результатов подтверждена корректным использованием математического аппарата и результатами, полученными при использовании разработанного программного комплекса при их сравнении с экспериментальными данными.

Научная новизна исследования состоит в том, что построена контактная пространственная нестационарная модель, учитывающая влияние выбранной шлакообразующей смеси (ШОС) и ее теплофизических характеристик на процессы теплообмена в кристаллизаторе МНЛЗ. Модель позволяет определить основные теплофизические характеристики заготовки и стенок кристаллизатора по его высоте. На основе модели разработан пакет программ, позволяющий проводить численные эксперименты по моделированию тепловых процессов в кристаллизаторе МНЛЗ. Впервые создана методика, позволяющая учитывать влияние ШОС на тепловые процессы, проходящие в кристаллизаторе МНЛЗ. Разработана методика расчета водяного охлаждения стенок кристаллизатора с учетом влияния турбулентной теплопроводности.

Практическая ценность работы определяется тем, что её результаты могут быть использованы для контроля и управления тепловыми режимами процессов теплообмена в кристаллизаторе МНЛЗ. Математическая модель позволяет исследовать возможность возникновения аварийных режимов, связанных с превышением максимально возможной скорости вытягивания слитка; определение минимальной высоты кристаллизатора; оптимизацию толщины стенки и др. Результаты моделирования могут быть использованы при проектировании новых кристаллизаторов МНЛЗ. Показана возможность моделирования кристаллизаторов с толщиной рабочей поверхности стенки до 50 мм и увеличения скорости разливки до 1,5 м/с. Установлено, что толщину шлаковой прослойки целесообразно увеличить до 0,19 мм, о чем имеется акт о внедрении результатов работы. Использование полученных алгоритмов в учебном процессе вузов позволит существенно повысить качество подготовки специалистов и ее эффективность.

Апробация. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и семинарах:

- VI Всероссийской конференции молодых ученых, ГОУ ВПО «КемГУ», Кемерово, 2005 г.;
- 64-й научно-технической конференции, посвященной 100-летию Г. И. Носова, ГОУ ВПО «МГТУ», Магнитогорск, 2005 г.;
- ежегодных научно-практических конференциях ГОУ ВПО «МаГУ», Магнитогорск.

Публикации. Основные результаты исследования опубликованы в 11 научных работах. Статья [1] опубликована в журнале из списка рекомендованных ВАК. В работах [4, 6–8] К. Н. Вдовину принадлежит постановка задачи, С. А. Повитухину принадлежат все полученные результаты. Получено свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 6508.

Объем и структура работы. Работа состоит из введения, 4 глав, заключения и библиографического списка, состоящего из 115 наименований, и содержит 142 страницы текста, 80 рисунков, 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель работы и определяются основные направления исследования. Приведено краткое изложение материала работы по главам.

В **первой главе** выполнен анализ современного состояния научно-исследовательских работ по проблеме изучения теплофизического состояния слитка в кристаллизаторе МНЛЗ.

В настоящее время накоплен большой объем материала, посвященного проблеме качества слитков (А. А. Скворцов, А. Д. Акименко, А. В. Лейтес), кристаллизации сплавов в интервале температур между температурой солидуса $T_{сол}$ и ликвидуса $T_{лик}$ (Ю. А. Самойлович, Д. П. Евтеев, В. А. Журавлев, В. Т. Борисов) и математических моделей затвердевания слитков в кристаллизаторе (В. В. Соболев, П. М. Трефилов, В. В. Виноградов, Л. С. Рудой).

Для численного решения краевых задач выбраны конечно-разностные и проекционно-сеточные методы.

Во **второй главе**, для разработки методики расчета температурного поля слитка и стенки кристаллизатора и сравнения полученных результатов численных расчетов с имеющимися литературными данными, рассмотрены две упрощенные задачи: а) нахождение температурного поля заготовки, при условии что задан тепловой поток на границе слитка и стенки кристаллизатора; б) охлаждение стенки кристаллизатора водяным потоком. При этом значения тепловых потоков на поверхностях $q = f(z)$, как это обычно принято, взяты из литературных источников.

На рис. 1 приведена принципиальная схема кристаллизатора. Начало координат расположено на зеркале металла в центре слитка и ось Oz направлена вниз, по направлению вытягивания слитка.

Здесь используются безразмерные величины: L_x, L_y – размеры слитка (от его центра до боковых поверхностей); L_z – длина рабочей зоны кристаллизатора, от зеркала металла до нижней кромки кристаллизатора; l_x, l_y – толщина водоохлаждаемой стенки кристаллизатора в направлении осей x и y . Безразмерное уравнение теплопроводности имеет вид:

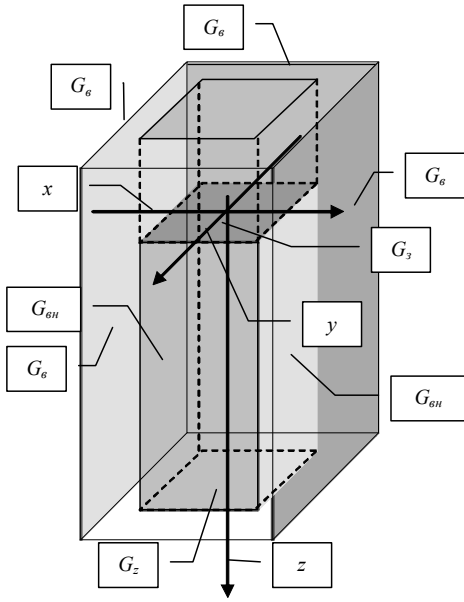


Рис. 1 Кристаллизатор

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = Fo \nabla(\lambda \nabla T) - Ho \rho c \vec{V} \nabla T \quad (1)$$

$$\text{где: } \rho c = \begin{cases} \rho_\phi c_\phi, & \text{для стенок;} \\ \rho_m c_m, & T < T_{сол} \text{ или } T > T_{лик}; \\ \rho_n \left(c_n + N \frac{dS}{dT} \right), & T_{сол} \leq T \leq T_{лик}; \\ \rho_g c_g, & \text{для потока воды;} \end{cases}$$

$$S(T) = \begin{cases} 0, & T < T_{сол}; \\ V_{жс}/V_э, & T_{сол} \leq T \leq T_{лик}; \\ 1, & T > T_{лик}; \end{cases} \quad \text{— параметр агрегатно-}$$

го состояния, соответствующий объемной доле жидкой фазы в двухфазной зоне $S = V_{жс}/V_э$. Зависимость $S(T)$ определяется по равновесной диаграмме конкретного материала;

$$\vec{V} = \begin{cases} 0, & \text{для стенок;} \\ \vec{V}_m = (0, 0, V_c), & \text{для слитка;} \\ \vec{V}_g = (0, 0, -V_g), & \text{для воды.} \end{cases} \quad \begin{array}{l} V_c \text{ — скорость вытягивания слитка;} \\ V_g \text{ — скорость подачи воды;} \end{array}$$

$Fo = \lambda_0 t_0 / \rho_0 c_0 l_0^2$ — критерий Фурье; $Ho = v_0 t_0 / l_0$ — критерий гомохромности; $N = \kappa_{yd} / c_0 T_0$ — критерий, характеризующий процесс затвердевания; κ_{yd} — удельная теплота плавления; индексы ϕ, m, n , указывают коэффициенты для стенок формы, некристаллизующегося металла и переходной зоны соответственно. Остальные обозначения носят общепринятый характер. Предполагается, что ρ, c, λ являются функциями температуры.

Начальные и граничные условия для слитка в безразмерной формулировке имеют вид:

- начальная температура равна температуре перегрева T_{nep} жидкого металла: $T_m(x, y, z, 0) = T_{nep}$; (2)

- температура сплава на поверхности зеркала металла $z = 0$ равна температуре перегрева T_{nep} : $T_3(x, y, 0, t) = T_{nep}$; (3)

• на нижней кромке кристаллизатора $z = L_z$ тепловой поток отсутствует: $\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} = 0$; (4)

• на границе наружной поверхности отливки $x = L_x$ и $y = L_y$ задаются тепловые потоки: $\lambda_m \frac{\partial T_m(x, y, z, t)}{\partial x} = q_x$ и $\lambda_m \frac{\partial T_m(x, y, z, t)}{\partial y} = q_y$. (5)

Значения тепловых потоков $q_x = 0$, $q_y = f(z)$ взяты из литературных источников. В третьей главе, значения тепловых потоков будут определяться при решении контактной задачи;

• на плоскостях симметрии слитка xOz и yOz тепловые потоки отсутствуют: $\frac{\partial T(x, 0, z, t)}{\partial x} = 0$ и $\frac{\partial T(0, y, z, t)}{\partial y} = 0$. (6)

Для решения приведенной начально-краевой задачи (1)–(6) используется метод Галеркина. При этом соответствующими дискретными аппроксимирующими уравнениями, в слабой формулировке, будут:

$$\sum_{e=1}^E \iiint_{\Omega^e} \lambda \nabla N_l \nabla \bar{T} d\Omega + \sum_{e=1}^E \iiint_{\Omega^e} \left[N_l F \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + Ho \vec{V} \nabla \bar{T} \right) \right] d\Omega = \sum_{e=1}^E \iint_{S^e} (N_l q_y) dS, \quad (7)$$

при условии, что $\bigcup_{e=1}^E \Omega^e = \Omega$ и $\bigcup_{e=1}^E S^e = S$. Здесь принято: $F = \rho c / F_0$; Ω^e – объем элемента e ; S^e – часть границы Ω^e , лежащая на S ; E – общее число подобластей Ω^e ; $\bar{T} = \sum_{m=1}^M T_m(t) N_m(x, y, z)$ – приближенное значение температуры; M – число узлов дискретизации.

Подставив в (7) аппроксимацию \bar{T} и перегруппировав члены, приходим к системе уравнений:

$$C \frac{d\tilde{T}}{dt} + A\tilde{T} = B. \quad (8)$$

Аппроксимируя конечными разностями производную по времени, окончательно получим: $C^n \tilde{T}^{n+1} + \Delta t A^n \tilde{T}^{n+1} = \Delta t B^n - C^n \tilde{T}^n$, (9)

где элементы матриц A^n, C^n и матрицы–столбца B^n определяются суммированием отдельных вкладов элементов Ω^e и имеют вид:

- $C_{lm}^n = \sum_{e=1}^E \iiint_{\Omega^e} F_n^e N_l N_m d\Omega^e ;$
- $A_{lm}^n = \sum_{e=1}^E \iiint_{\Omega^e} (\lambda_n^e \nabla N_l \nabla N_m + F_n^e Ho \vec{V}^e N_l \nabla N_m) d\Omega^e ;$
- $B_l^n = \sum_{e=1}^E \iint_{S^e} N_l q_{y_n}^e dS^e .$

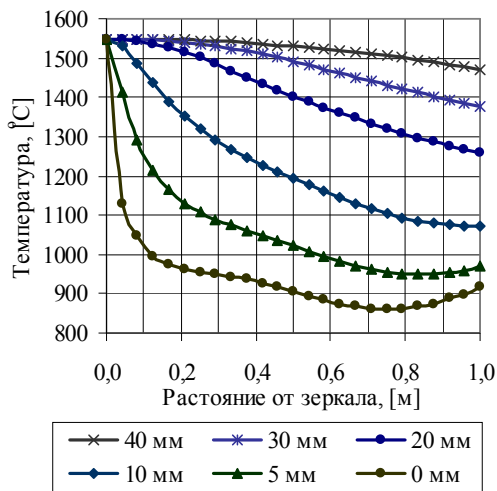


Рис. 2. Изменение температуры по высоте слитка на различном расстоянии от поверхности заготовки.

не широкой грани слитка на различном расстоянии от поверхности заготовки. Расчет производился при следующих параметрах: скорость вытягивания слитка $V_{сл} = 1 \text{ м/мин}$; перегрев $T_{пер} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, марка стали – Сталь 20.

В литературных источниках приводятся экспериментальные значения температуры поверхности слитка на выходе из кристаллизатора $> 1150 \text{ }^\circ\text{C}$, а толщина корочки в пределах 30–40 мм. Следует отметить, что сведения о тепловых потоках, температурах поверхности слитка на выходе и толщине корочки приводятся в литературе раздельно и не согласованы между собой. Используя закон Фурье, сведения о толщине корочки и температуре поверхности, получаем тепловые потоки в 1,5–2 раза меньше, чем приведены в литературе. Из анализа численного эксперимента также следует, что при тепло-

Для решения полученной системы алгебраических уравнений использовался метод неполной релаксации. В алгебраической форме итерационная схема записывается в следующем виде: $x_i^k = (1 - \omega)x_i^{k-1} +$

$$\omega \left\{ d_i - \sum_{j=1}^{i-1} g_{ij} x_j^k - \sum_{j=i+1}^n g_{ij} x_j^{k-1} \right\},$$

где $g_{ij} = a_{ij}/a_{ii}$ и $d_i = f_i/a_{ii}$.

Вычислительная устойчивость и сходимость итерационной схемы установлены в результате многочисленных расчетов.

На рис. 2 приведены результаты расчетов распределения температур в середи-

вых потоках, значения которых приводятся в литературе¹, поверхность слитка сильно переохлаждается. Температура поверхности слитка 700–1000 °С, а толщина корочки слитка 35–57 мм. Это говорит о том, что значения тепловых потоков должны быть меньше. По-видимому, различие связано с тем, что в литературе приводятся значения потоков, возникающие при ненормальном режиме работы кристаллизатора, например, при прорыве металла, когда тепловой поток повышен. Сведения о толщине корочки и температуре поверхности заготовки приводятся для нормального режима работы кристаллизатора, при котором тепловые потоки значительно меньше.

Начальные и граничные условия для второй задачи охлаждения стенки кристаллизатора водяным потоком имеют вид:

- Температура стенок кристаллизатора в начальный момент времени равна температуре воды на входе: $T_{\phi}(x, y, z, 0) = T_{ex}$. (10)

- На поверхностях G_s и G_z : на уровне верхней и нижней кромки стенки кристаллизатора тепловой поток отсутствует: $\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} = 0$. (11)

- На поверхности $G_{вн}$: на границе внутренней поверхности кристаллизатора $y = L_y$ задается входящий тепловой поток:

$$\lambda_{\phi} \frac{\partial T_{\phi}(x, y, z, t)}{\partial y} = -q_y. \quad (12)$$

- На поверхности G_e : на границе внешней поверхности кристаллизатора и потока воды $y = L_y + l_y$ соблюдается равенство уходящего и входящего потоков тепла, а также равенство температур стенки и воды:

$$\lambda_{\phi} \frac{\partial T_{\phi}(x, y, z, t)}{\partial y} = \lambda_e \frac{\partial T_e(x, y, z, t)}{\partial y}, \quad T_{\phi}(x, y, z, t) = T_e(x, y, z, t). \quad (13)$$

Для плоскости yOz , проходящей через центр, и у боковой поверхности слитка имеет место равенство нулю тепловых потоков:

¹ См.: Буланов Л. В. и др. Расчетно-аналитические исследования тепловых процессов в кристаллизаторе // Сталь. 1999. № 9. С. 24–26; Савченко В. В. Тепловая работа радиального кристаллизатора для отливки заготовок крупных сечений // Непрерывное литье стали: темат. сб. / под ред. Д. П. Ефтеева. – М.: Металлургия, 1978. № 5. С. 79–83; Дождиков В. И. Экспериментальное исследование теплопередачи в кристаллизаторе вертикальной МНЛЗ // Непрерывная разливка стали: темат. сб. – М.: Металлургия, 1981. № 7. С. 83–85.

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} = 0. \quad (14)$$

Для потока воды имеем следующие начальные и граничные условия:

- В начальный момент времени температура воды равна температуре, заданной на входе в канал: $T_g(x, y, z, 0) = T_{gx}$. (15)

- На поверхности G_z , т. е. в точке подачи охлаждающей воды $z = L_z$, задана температура воды на входе T_{gx} : $T_g(x, y, z, t) = T_{gx}$. (16)

- На внешней границе водяного потока $y = L_y + l_y + l_g$ тепловой поток отсутствует: $\frac{\partial T_g(x, y, z, t)}{\partial y} = 0$. (17)

- На поверхности G_3 ($z = 0$) и на боковых поверхностях тепловой поток отсутствует: $\frac{\partial T_g(x, y, z, t)}{\partial z} = 0$. (18)

Возможным подходом к решению задачи о теплообмене между стенкой кристаллизатора и водой является введение понятия турбулентной теплопроводности¹, при использовании теории пограничного слоя. Для определения толщины вязкого подслоя и скорости воды на его границе применяем зависимости, взятые из литературы²:

$$\delta^* = \frac{194}{\text{Re}_z^{0,7}} \delta, \quad \delta = \frac{0,376}{\text{Re}_z^{0,2}} z, \quad v^* = \frac{2,12}{\text{Re}_z^{0,1}} v_{cp} \quad \text{и} \quad \text{Re}_z = \frac{v_{cp} z}{\nu}, \quad (19)$$

где: z – расстояние от кромки поверхности; v_{cp} – средняя скорость в потоке; δ – толщина пограничного слоя; δ^* – толщина вязкого подслоя; v^* – скорость на границе вязкого подслоя; Re_z – число Рейнольдса.

При задании профиля скоростей в (1), получим замкнутую систему уравнений, описывающую водяное охлаждение стенки. Для расчета тепловых полей стенки кристаллизатора и водяного потока использовался алгоритм:

1. Находится поле температур стенки кристаллизатора. На границе с водой тепловой поток определяется по формуле: $q = c_g \rho_g T_g v_y$, где скорость v_y определяется из зависимости температуры поверхности от величины

¹ Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: в 2 т. : пер. с англ. А. И. Державиной. М. Мир, 1991. Т. 2.

² Луканин В. Н. Теплотехника: учебник для вузов М. : Высшая школа, 1999. 453 с.

теплового потока, взятой из литературы¹. При этом на границе выполняется равенство температур стенки формы и воды: $T_\phi = T_e$.

2. Вычисляется поле температур в воде. На границе задается равенство тепловых потоков: $\lambda_\phi \frac{\partial T_\phi}{\partial y} = \lambda_e \frac{\partial T_e}{\partial y}$. Толщина вязкого подслоя δ^* и скорость v^* на его границе определяются из (19).

3. Условием завершения численного расчета является выход нестационарного процесса на стационарный режим, критерием которого является равенство количества тепла, поступившего в кристаллизатор, и количества тепла, отведенного с водой:

$$\iint_S \lambda_\phi \frac{\partial T_\phi}{\partial y} dS = \iiint_\Omega v_z \rho_e c_e T_e d\Omega.$$

Количество тепла, отведенного водой, зависит от величины турбулентной теплопроводности λ_m , определяемой из численного эксперимента.

В третьей главе рассматривается нестационарная трехмерная контактная задача, описывающая непрерывную разливку

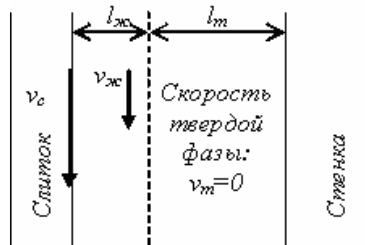


Рис. 3. Структура гарнисажа

металла в кристаллизаторе МНЛЗ с использованием ШОС и учитывающая процессы в слитке, гарнисаже и стенке кристаллизатора. Гарнисаж представляет собой шлак, расположенный ниже зеркала металла между оболочкой слитка и стенками кристаллизатора. В литературе² приводятся

сведения о том, что на стенках кристаллизатора гарнисаж имеет двухслойную структуру: твердую, нерасходуемую часть толщиной до 2 мм и расходуемую часть толщиной 0,1 – 0,3 мм.

На рис. 3 приведена принципиальная схема структуры гарнисажа, образующегося при вытягивании слитка со скоростью v_c . Жидкая часть прослойки движется с некоторой скоростью $0 < v_{жс} \leq v_c$. На границе, контактирующей со слитком, задана температура, равная температуре слитка: T_m . На другой границе задана температура внутренней стенки кристаллизатора: T_ϕ .

¹ Вюнненберг К. Возможности и пределы теплопередачи в кристаллизаторах МНЛЗ // Черные металлы. Декабрь 2000. С. 35–41.

² Процессы непрерывной разливки : монография / А. Н. Смирнов [и др.]. Донецк : ДонНТУ, 2002. 536 с.; Евтеева В. Ф. Применение порошкообразных шлакообразующих смесей при разливке стали на МНЛЗ М., 1984 (Обзор по системе Информсталь / ин-т «Черметинформация», 31(210), 22 с.).

На границе раздела жидкой и твердой фаз гарнисажа температура равна температуре затвердевания шлака и выполняется равенство тепловых потоков:

$$T_{\text{зам}} = T_{\text{ж}} = T_{\text{тв}}, \quad \lambda_{\text{ж}} \frac{\partial T_{\text{ж}}(x, y, z, t)}{\partial y} = \lambda_{\text{тв}} \frac{\partial T_{\text{тв}}(x, y, z, t)}{\partial y}. \quad (20)$$

Из (20) имеем толщину твердой части $l_{\text{тв}}$, равную:
 $l_{\text{тв}} = \lambda_{\text{тв}}(T_{\text{зам}} - T_{\text{ф}}) / \lambda_{\text{ж}}(T_{\text{ф}} - T_{\text{зам}}) l_{\text{ж}}$.

Толщину жидкой прослойки гарнисажа $l_{\text{ж}}$ можно определять по усилию вытягивания, расходу ШОС и её физико-химическим характеристикам.

Расход ШОС определяется по формуле:

$$Q_{\text{ш}} = V_{\text{ш}} \rho_{\text{ш}} = P_{\text{сл}} h_{\text{м}} l_{\text{ж}} \rho_{\text{ш}} = P_{\text{сл}} v_{\text{ж}} t_{\text{м}} l_{\text{ж}} \rho_{\text{ш}}, \quad (21)$$

где $P_{\text{сл}}$ – периметр слитка; $v_{\text{ж}}$ – скорость движения ШОС в зазоре; $l_{\text{ж}}$ – толщина жидкой части прослойки; $h_{\text{м}}$ – высота слитка массой 1 т; $t_{\text{м}}$ – время вытягивания слитка массой 1 т; $\rho_{\text{ш}}$ – плотность ШОС.

Вторым уравнением для нахождения толщины жидкой прослойки $l_{\text{ж}}$, является формула силы вязкого трения: $F_{\text{тр}} = \eta S v / l_{\text{ж}}$,
 где η – вязкость смазки; S – площадь поверхности; v – скорость перемещения трущихся поверхностей. Из уравнений (21), (22), дополненных зависимостью: $v = f(v_{\text{ж}})$, которая определяется конструктивными особенностями кристаллизатора, находится зависимость толщины жидкой шлаковой прослойки $l_{\text{ж}}$ и её скорости $v_{\text{ж}}$ от различных параметров разливки и физико-химических характеристик применяемой ШОС.

Результаты расчетов, при варьировании параметров, влияющих на толщину ШОС (21), (22), показывают, что толщина жидкой прослойки шлака лежит в интервале 0,05–0,35 мм, скорость жидкой составляющей ШОС – в интервале 0,6–1,0 м/мин, что хорошо согласуется с экспериментальными данными, приведенными в литературе.

Заменяя граничные условия (5) и (12), получаем контактную задачу:

$$T_{\text{м}} = T_{\text{ж}}, \quad \lambda_{\text{м}} \frac{\partial T_{\text{м}}(x, y, z, t)}{\partial y} = \lambda_{\text{ж}} \frac{\partial T_{\text{ж}}(x, y, z, t)}{\partial y}. \quad (23)$$

$$T_{\text{ф}} = T_{\text{тв}}, \quad \lambda_{\text{ф}} \frac{\partial T_{\text{ф}}(x, y, z, t)}{\partial y} = \lambda_{\text{тв}} \frac{\partial T_{\text{тв}}(x, y, z, t)}{\partial y}. \quad (24)$$

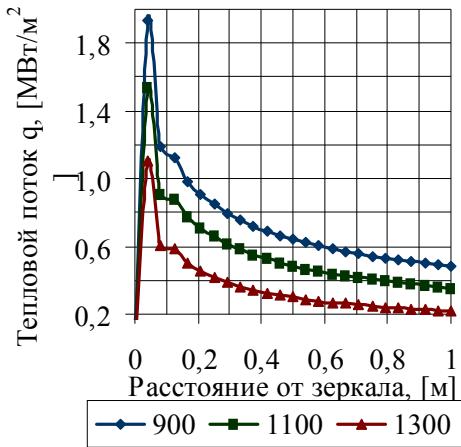


Рис. 4. Зависимость теплового потока из слитка от температуры за-

оптимальности:

- $J_1 = \int_0^H \int_0^a \int_0^b \sqrt{T_x'^2 + T_y'^2} dx dy dz \rightarrow \min$ – критерий вводится, исходя из требований

небольших градиентов температуры по толщине корочки слитка. Здесь ξ – граница твердой фазы;

- $J_2 = \int_0^H \int_0^a \int_0^b |T_x' - T_y'| dx dy dz \rightarrow \min$ – критерий определяет равномерность теплоотвода в поперечном сечении внутри корочки слитка;

- $J_3 = \int_0^H \int_0^a \int_0^b |T_{xz}''| dx dy dz \rightarrow \min$, $J_4 = \int_0^H \int_0^a \int_0^b |T_{yz}''| dx dy dz \rightarrow \min$ – критерии вводятся, исходя

из рекомендаций о желательности приблизительной прямолинейности распределения кривых температуры в продольном сечении затвердевающей части слитка;

- $J_5 = \iint_S |T_z'| dS \rightarrow \min$ – критерий определяет интенсивность продольного переноса тепла на боковой поверхности слитка.

В табл. 1 приведены средние значения температур, поток и толщины корочки, полученные по результатам расчетов при наиболее и наименее рациональном выборе ШОС. При оптимальном режиме разлива принято, что ШОС имеет следующие характеристики: теплопроводность ШОС1 – 0,75 Вт/(м²*К); температуру затвердевания – 1300 °С; толщину жидкой фазы – 0,23 мм. При наименее рациональном выборе ШОС приняты следующие параметры: теплопроводность ШОС8 – 1,6 Вт/(м²*К); температура затвердевания – 900 °С; толщина жидкой фазы – 0,15 мм.

На рис. 4 приведены результаты расчетов, полученные при использовании ШОС с различной температурой затвердевания. Из рисунка следует, что характеристики используемой ШОС существенно влияют на тепловое состояние слитка и стенки.

Повышение качества отливаемого слитка предъявляет ряд различных, иногда противоречивых, требований к условиям его формирования. Для определения оптимального теплового поля необходимо ввести критерии оптимальности, которые вводятся на основании качественных рекомендаций о желательном распределении температуры в слитке. В работе использовались следующие критерии

Таблица 1

Средние значения температур, поток и толщины корочки заготовки

Наименование	Min	Max
Средние поток, при $L=1000$ мм	308 кДж/(м ² *с)	842 кДж/(м ² *с)
Средний поток, при $L=600$ мм	356 кДж/(м ² *с)	995 кДж/(м ² *с)
Средняя температура поверхности	1385 °С	1050 °С
Средняя толщина корочки слитка	19 мм	29 мм
Толщина корочки слитка на выходе	30 мм	45 мм

Здесь L – длина кристаллизатора.

Анализ таблицы показывает, что выбором ШОС можно изменять величину теплового потока до 3 раз. Средняя толщина корочки при этом увеличивается не более чем в 1,5 раза. При этом значения критериев оптимальности изменяются в 4–7 раз, что приведет к снижению качества поверхности слитка и крайне нежелательно. Установление связи между качеством поверхности заготовки и значениями критериев оптимальности температурного поля слитка выходит за рамки работы, но представляет интерес.

На Магнитогорском металлургическом комбинате МНЛЗ оснащены комплексом "Кристаллизатор 2000", разработанным ЗАО "ТЕХНОАП". Используются кристаллизаторы с расстоянием от рабочей стенки до водоохлаждаемых каналов 30 мм. В них вмонтированы термодатчики на глубине 20 мм от рабочей стенки, которые позволяют контролировать распределение температуры по всему периметру кристаллизатора. Датчики расположены в три ряда – на расстоянии 68 мм, 180 мм и 330 мм от зеркала металла. Согласно данным, предоставленным ЗАО "ТЕХНОАП", средние значения температур по периметру кристаллизатора для каждого слоя датчиков равны: Слой 1 (68 мм) – 82 °С; Слой 2 (180 мм) – 66 °С; Слой 3 (330 мм) – 56 °С. Отклонение температур в течение 1 часа разлива не превышало 2 °С.

Нами были выполнены расчеты и получены следующие значения температур: Слой 1 (68 мм) – 82 °С; Слой 2 (180 мм) – 69 °С; Слой 3 (330 мм) – 69 °С. Отсюда следует, что результаты вычислений хорошо согласуются с экспериментальными данными. При расчетах использовалась ШОС, имеющая средние значения параметров: теплопроводность ШОС4 – 1,2 Вт/(м²*К); температура затвердевания – 1100 °С; толщина жидкой фазы – 0,19 мм.

В четвертой главе исследуются возможность повышения износостойкости кристаллизатора и производительности МНЛЗ, а также влияние теплотехнических характеристик разливаемого металла на тепловое состояние слитка и стенок. По результатам расчетов сделаны следующие выводы:

1. Максимальная толщина рабочей поверхности стенки зависит от характеристики используемой ШОС и может колебаться в диапазоне 20 – 50 мм.
2. Правильным подбором параметров ШОС можно повысить скорость вытягивания слитка до 1,5 м/мин.

3. Теплофизические характеристики металла существенно влияют на толщину корочки слитка и незначительно изменяют температуру стенки кристаллизатора.

Основные результаты работы приведены в **заключении**:

1. Впервые разработана нестационарная трехмерная контактная математическая модель, позволяющая проводить численные эксперименты по исследованию тепловых процессов в кристаллизаторе МНЛЗ.

2. Создана методика, позволяющая учитывать влияние ШОС на тепловые процессы, проходящие в кристаллизаторе МНЛЗ.

3. Сформулирована методика расчета водяного охлаждения стенок кристаллизатора с учетом влияния турбулентной теплопроводности.

4. Разработан пакет программ для проведения численного эксперимента по моделированию тепловых процессов в кристаллизаторе МНЛЗ, позволяющий определять рациональные теплотехнические режимы литья заготовок.

5. Установлено, что толщину шлаковой прослойки целесообразно увеличить до 0,19 мм, о чем имеется акт внедрения.

Список публикаций автора по теме диссертации

Статьи, опубликованные в журналах из списка ВАК:

1. Повитухин, С. А. Математическое моделирование процесса охлаждения слитка в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок / С. А. Повитухин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2009. – Т. 15. – № 3. – С. 672–681.

Другие публикации:

2. Повитухин, С. А. Математическое моделирование процессов формирования заготовки в кристаллизаторе машины непрерывного литья / С. А. Повитухин // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2007. – Вып. 6. – № 23(95). – С. 77.

3. Повитухин, С. А. Математическая модель процесса затвердевания сплава в кристаллизаторе / С. А. Повитухин // Литейные процессы : межрегион. сб. науч. тр. – Магнитогорск : ГОУ ВПО «МГТУ», 2000. – С. 102–107.

4. Вдовин, К. Н. Аппроксимация математической модели процесса затвердевания сплава в кристаллизаторе / К. Н. Вдовин, С. А. Повитухин // Теория и технология металлургического производства : сб. науч. тр. / под ред. В. М. Колокольцева. – Магнитогорск : ГОУ ВПО «МГТУ», 2001. – 206 с. – С. 145–151.

5. Повитухин, С. А. Моделирование водяного охлаждения кристаллизатора / С. А. Повитухин // Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии : межвуз. сб. науч. тр. / под ред. Б. Н. Парсункина. – Магнитогорск : ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. – С. 133–138.

6. Вдовин, К. Н. Расчет толщины шлакового гарнисажа / К. Н. Вдовин, С. А. Повитухин // Теория и технология металлургического производства : сб. науч. тр. / под ред. В. М. Колокольцева. – Магнитогорск : ГОУ ВПО «МГТУ», 2005. – 196 с. – С. 29–32.

7. Вдовин, К. Н. Моделирование толщины и скорости движения гарнисажа в кристаллизаторе МНЛЗ / К. Н. Вдовин, С. А. Повитухин // Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии : межвуз. сб. науч. тр. / под ред. Б. Н. Парсункина. – Магнитогорск : ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. – С. 129–133.

8. Вдовин, К. Н. Определение оптимальных режимов при непрерывной разливке стали / К. Н. Вдовин, С. А. Повитухин // Теория и технология металлургического производства : сб. науч. тр. / под ред. В. М. Колокольцева. – Магнитогорск : ГОУ ВПО «МГТУ», 2005. – С. 122–128.

9. Повитухин, С. А. Влияние параметров шлакообразующей смеси на толщину рабочей стенки кристаллизатора / С. А. Повитухин // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании : сб. науч. тр. – Магнитогорск : ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. – С. 106–110.

10. Повитухин, С. А. Апробация математической модели затвердевания заготовки в кристаллизаторе МНЛ / С. А. Повитухин, К. Н. Вдовин // Литейные процессы : межрегион. сб. науч. тр. – Магнитогорск : ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. – С. 195–198.

11. Повитухин, С. А. Программное обеспечение «Математическое моделирование охлаждения слитка в кристаллизаторе МНЛЗ при разливке под шлаком»: свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 6508 / С. А. Повитухин // Инновации в науке и образовании. – 2007. – № 5. – С. 11.