

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
ДОНЕЦКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

ПЕТРЕНКО Сергей Степанович

УДК 669.18.065:536.24

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ
И ГРАВИТАЦИОННОЙ КОНВЕКЦИИ
В СТАЛЬНОМ СЛИТКЕ И ЕЕ ВЛИЯНИЯ
НА ФОРМИРОВАНИЕ УСАДОЧНЫХ РАКОВИН

Специальность 05.16.02 — «Металлургия
черных металлов»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ДОНЕЦК — 1992

Диссертационная работа выполнена в Донецком ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте.

Научный руководитель — кандидат технических наук, доцент А. А. Троянский.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Казачков Е. А.; кандидат технических наук, старший научный сотрудник Бородин В. С.

Ведущее предприятие — завод «Днепроспецсталь» (г. Запорожье).

Защита диссертации состоится «29» октября 1992 г. в час. на заседании специализированного совета Д 068.20.01 в Донецком политехническом институте (340000, г. Донецк, ул. Артема, 58).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Донецкого политехнического института.

Автореферат разослан «25» сентября 1992 г.

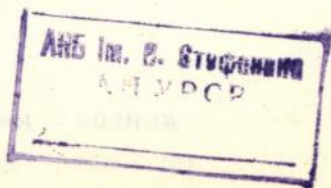
Ученый секретарь
специализированного совета

А. А. ТРОЯНСКИЙ

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00816473 (Т)



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Проблема повышения качества выплавляемой стали является одной из наиболее актуальных в чёрной металлургии. В настоящее время наибольшее количество стали (87%) разливается в слитки и согласно прогнозам в ближайшие 10-15 лет этот показатель будет оставаться достаточно высоким.

Кристаллизация жидкой стали — сложный многофакторный процесс. При формировании физико-химической структуры слитка, которая характеризуется, в частности, наличием усадочных дефектов, очень важную роль играет конвективный теплоперенос в жидком ядре и двухфазной зоне затвердевающего расплава. Гидродинамический фактор, являясь неотъемлемой частью процесса затвердевания, неизбежно оказывает существенное влияние на качество конечной продукции.

Производство стальных слитков с заданными техническим проектом свойствами предполагает наличие средств для прогнозирования конечных результатов, управления и анализа самого процесса формирования физической структуры слитка. Возникающие при проведении комплексных экспериментальных исследования трудности принципиального характера выводят в число наиболее эффективных современных средств для достижения указанных целей методы математического моделирования. Достоверность прогноза качества слитка и результатов анализа определяется степенью соответствия моделей реальным процессам. Разработка и реализация моделей в рамках соответствующих САПР технологий производства стальных слитков открывает перспективы эффективного управления качеством слитка.

Рассматриваемая в настоящей работе проблема связана с конкретным процессом, имеющим место в современных технологиях: затвердевание железоуглеродистых расплавов в изложнице при утеплении головной части теплоизоляционными вкладышами и зеркала металла экзотермической смесью.

Целью данной работы является разработка и реализация математической модели процесса формирования слитка в системе изложница-железуглеродистый расплав-утепляющая конструкция-окружающая среда с учетом тепловой конвекции, двухфазных потоков и осаждения свободных кристаллов, а также проведение при помощи вычислительного эксперимента анализа гидродинамических, тепловых и кинетических процессов в не затвердевшей части слитка и изучение их влияния на формирование усадочных раковин в слитках спокойной стали.

Научная новизна. Работа включает следующие новые научные результаты и положения выносимые на защиту:

- разработана на основании принципов механики многофазных сред обобщенная математическая модель процесса затвердевания слитка спокойной стали, учитывающая совместно протекающие тепловую конвекцию и гравитационную (обусловленную наличием жидко-твердой части двухфазной зоны), а также осаждение свободных кристаллов;
- построены модель и алгоритм для расчета высокоинтенсивной тепловой конвекции в затвердевающем слитке при переходном к турбулентности режиме;
- разработаны методика и алгоритм расчета конфигурации открытых и закрытых усадочных раковин, основанные на использовании данных о распределении доли твердой фазы;
- выполнены численные исследования затвердевания в системе слиток-изложница-утеплитель-окружающая среда, на основании которых установлена подробная схема развития и функционирования естественно-конвективного процесса, включая развитие двухфазных течений и седиментацию твердой фазы;
- выполнены исследования по выявлению механизма влияния конвективных потоков различной природы на формирование открытых и закрытых усадочных раковин;

– установлены основные требования к оптимальной организации естественноконвективного движения, на основании которых предложен консольный тип вкладышей для формирования головной части уширенного к концу слитка.

Научная значимость. Представленная в настоящей работе схема построения математической модели формирования слитков основана на использовании основного метода механики многофазных сред – метода осреднения по элементарному объему, что существенно расширяет возможности учета в вычислительных экспериментах новых физических и технологических факторов, оказывающих непосредственное влияние на качество слитка. Построенная математическая модель, учитывающая совместно протекающие в жидком ядре слитка тепловую конвекцию, осаждение свободных кристаллов и обусловленную двухфазными потоками гравитационную конвекцию, позволяет исследовать значительно более широкий спектр тепловых и гидродинамических явлений при затвердевании слитков.

В ходе вычислительного эксперимента впервые получена детальная схема развития естественноконвективного процесса, определены особенности его функционирования и структура потоков. Учет при моделировании двухфазных течений позволил выявить роль и оценить вклад этого гидродинамического фактора в развитие поля концентраций твердой фазы, которое определяет механизмы образования усадочных дефектов. При этом особое значение приобретает учет влияния двухфазных потоков в случае проектных и оптимизационных работ для слитков с широким интервалом кристаллизации.

Разработанная в виде алгоритмов и программ общая математическая модель затвердевания может полностью входить в функциональное ядро САПР технологий производства стальных слитков.

Практическая значимость данной работы определяется ее прикладным характером. Предложенная модель, реализованная в пакетах

прикладных программ, позволяет в практике научных исследований получать температурные, гидродинамические и кинетические поля для широкого интервала исходных параметров, которыми характеризуются современные технологии производства стальных слитков.

Программный комплекс, включающий также методику расчета конфигурации открытых и закрытых усадочных раковин, позволяет осуществлять поиск и выбор оптимальных (в смысле уменьшения головной обрезки) наборов конструкционных и режимных параметров процессов, что позволяет значительно сократить количество трудоемких экспериментов в производственных условиях.

Пакеты прикладных программ внедрены в практику оптимизирующих расчетов при проектировании технологий производства стальных слитков и отливок в ИЧМ, ПО "Невский завод", ДонНИИчермет. Общий доле-вой экономический эффект от использования результатов разработок составил 82.5 тыс. рублей.

Апробация работы. Материалы диссертация доложены и обсуждены на конференциях и семинарах: на 7-й Всесоюзной конференции по тепломассообмену (г. Минск, 1984); на 2-й конференции молодых ученых и специалистов Украины по вопросам исследования методов повышения качества продукции литейного производства (г. Киев, 1981); на Всесоюзной конференции по проблемам стального слитка (г. Киев, 1984); на Всесоюзном совещании-семинаре молодых ученых "Явления переноса в газах и жидкостях" (г. Алма-Ата, 1986); на Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы повышения качества металлопродукции по основным переделам черной металлургии" (г. Днепропетровск, 1989); на 4-й научно-технической конференции "Автоматизация проектирования и управления качеством отливок" (г. Санкт-Петербург, 1991).

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в восемнадцати печатных работах.

Объем работы. Диссертация изложена на 167 страницах машинописного текста и содержит введение, 5 глав, заключение, 63 рисунка, 2 таблицы, список использованной литературы из 93 наименований и приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ современного состояния проблемы соответственно выбранным направлениям исследования: 1) модели двухфазной зоны (ДФЗ); 2) естественная конвекция кристаллизующегося расплава. Эти вопросы прямо связаны с механизмом формирования усачных раковин.

Математические модели могут классифицироваться как по методу определения поля концентрации (доли) твердой фазы, так и по способу учета движения расплава в жидком ядре и в ДФЗ слитка. В моделях, основанных на применении широко распространенного правила равновесного рычага, традиционно предполагается отсутствие массообмена между соседними макроточками (элементарными объемами) ДФЗ и отсутствие переохлаждения. Диффузия примеси в твердой и жидкой фазах в макроточке протекает полностью. Реальный процесс в ДФЗ существенно отличается от равновесной схемы в основном из-за отсутствия выравнивания концентрации примеси по твердой фазе. Это обстоятельство учитывается в квазиравновесной теории В.Т.Борисова, основные положения которой, — в пределах любой макроточки ДФЗ растворенный компонент диффундирует полностью, между составами расплава и поверхности растущих дендритов устанавливается равновесие согласно диаграмме состояния. Перемещение расплава в ДФЗ не учитывается. При отсутствии массообмена между макроточками квазиравновесная теория приводит к известному правилу неравновесного рычага. Однако применение этого правила при расчетах высокоинтенсивных процессов формирования ДФЗ может привести к значительным погрешностям в прогно-

зах, так как в этом случае градиенты концентрации примеси достигают большой величины.

Перенос примеси в ДФЗ, вызванный фазовой усадкой, учтен в модели В.А.Журавлева для жидко-твердой части ДФЗ. Однако, здесь не решается проблема учета конвективного движения, обусловленного температурными и концентрационными градиентами. Типичным для приведенных моделей ДФЗ является вывод балансовых уравнений исходя из общих соображений по удовлетворению соответствующим законам сохранения массы примеси и энтальпии. Двухфазная среда, предполагается, уже обладает однородными свойствами, что и позволяет записывать уравнения баланса в общеизвестной форме для гомогенных сред.

Возможен иной подход к построению моделей двухфазного состояния при кристаллизации, основанный на использовании процедур пространственного осреднения дифференциальных уравнений баланса, непосредственно описывающих процессы переноса в каждой из фаз среды. Осреднение проводится по некоторому элементарному объему отдельно для твердой и жидкой фаз. Объединение разнофазных осредненных уравнений приводит к полным уравнениям баланса энтальпии, массы примеси и др. в кристаллизующейся двухфазной среде. Используя методы механики многофазных сред И.Л.Воробьев предложил модель, в которой осреднение предварительно проводится для некоторой величины, обладающей свойствами термодинамической функции состояния. На основе полученного обобщенного уравнения баланса последовательно выводятся уравнения баланса для осредненных энтальпии, концентрации примеси (углерод), импульса и массы среды. Однако система уравнений остается незамкнутой и не может использоваться для решения конкретных задач затвердевания, к тому же учет движения расплава удалось провести только для фильтрационных течений.

В реальных условиях конвекция при формировании слитка имеет место везде, где металл сохраняет текучесть. Основные факторы, вы-

ывающие конвекцию, — неоднородность температуры, доля твердой фазы (до границы выливаемости), осаждение свободных кристаллов и усадка, сопутствующая фазовым превращениям. Все остальные причины можно отнести к разряду внешних воздействий.

Экспериментальные исследования естественной конвекции в стальном слитке осложнено целым рядом объективных обстоятельств: непрозрачность, высокая температура, химическая агрессивность, экранирующие свойства и др. Практически единственным приемлемым методом является применение радиоактивных изотопов для регистрации и общей оценки интенсивности конвекции. Однако, этими методами весьма затруднительно определять тонкую структуру течений, ее особенности и динамику скоростных полей в жидком ядре.

Для детального изучения структуры течений более эффективным методом является физическое моделирование. Подбор соответствующего модельного вещества позволяет применять различные методы термоанемометрии и визуализации, что обеспечивает необходимую точность результатов при исследованиях отдельных фрагментов процесса. Тем не менее основная трудность физического моделирования — невозможность одновременного удовлетворения всем критериям подобия. Это обстоятельство не позволяет уверенно распространять выводы, сделанные по результатам эксперимента, на натурные объекты. Анализ совокупности требований, удовлетворение которым должно обеспечить полное подобие модельного и реального процессов формирования слитков, показывает, что создать полную физическую модель такого процесса не представляется возможным.

Эффективным методом исследований, который в настоящее время получает широкое распространение, является вычислительный эксперимент, проводимый на математических моделях изучаемого объекта. Математическое моделирование позволяет непосредственно учитывать все многообразие связей в кристаллизующемся слитке.

На основании анализа состояния проблемы при определении задач исследований возникает комплекс вопросов, решение которых относится как к разработке собственно математической модели физических процессов и условий производства слитков, так и к проведению вычислительного эксперимента. Необходимо разработать функциональную модель процессов теплопереноса и гидродинамики с учетом двухфазного состояния кристаллизующейся среды, построение которой проводится на основе положений механики многофазных сред. Особое внимание следует обратить на адекватное отражение в модели течений, обусловленных текучестью жидко-твердой части ДФЗ. Требуется осуществить моделирование всей системы затвердевающий слиток-наложница-утеплитель, учитывая ее связи с внешней средой. Целесообразность такого решения заключается в учете взаимообусловленных связей между частями системы, а также в возможности обходиться устойчивым набором исходных параметров и условий, включая те из них, которые определяют характер взаимодействия системы с внешней средой.

В ходе вычислительного эксперимента на основании результатов многовариантных расчетов необходимо изучить структуру естественно-конвективного течения в жидком ядре слитка, при этом произвести оценку вклада двухфазных потоков. Оказывая влияние на тепловую обстановку в жидком ядре, конвекция тем самым влияет на кинетику кристаллизации, поэтому следует рассмотреть воздействие гидродинамических факторов на геометрические параметры усадочных раковин (как открытых, так и закрытых). В этой связи также рассматривается взаимодействие приобъемной части слитка с его телом и при этом надлежит определять характер и особенности обмена теплом между этими частями и роль конвективного движения в таком теплообмене.

Во второй главе проводятся построение математической модели затвердевания и постановка базовой краевой задачи для исследуемой системы. Исходным для модели кристаллизации железоуглеродистых сплавов служит обобщенное уравнение баланса неравновесной термо-

динамики в однородной среде. Для использования его при выводе уравнений переноса в двухфазной зоне принято приближение усредненных континуумов. Описание двухфазных сред предполагает два основных подхода: 1) усреднение параметров, характеризующих физические свойства различных фаз гетерогенной среды, с последующим вводом их в обобщенное уравнение баланса соответствующей термодинамической величины; 2) усреднение непосредственно самих фундаментальных уравнений механики сплошных сред, описывающих процессы переноса в каждой из фаз. Если Q_0, Q_1, Q_2 - объемы макроточки, твердой и жидкой фаз в ней, то правила осреднения по данным объемам любой термодинамической функции состояния определяются как

$$\langle f \rangle_{a,1,2} = \frac{1}{Q_{a,1,2}} \int_{Q_{a,1,2}} f dv; \quad \langle f \rangle_0 = \xi \langle f \rangle_1 + (1-\xi) \langle f \rangle_2, \quad (1)$$

где $\xi = Q_1/Q_0$ - доля твердой фазы.

Для вывода системы уравнений баланса (переноса) всех искомым величин комбинированно применяются оба подхода. Процесс кристаллизации расплава стали описывается системой безразмерных дифференциальных уравнений баланса осредненной энтальпии, доли твердой фазы, вихря скорости и уравнения Пуассона для функции тока:

$$C_3 \frac{\partial \theta}{\partial F_0} = \nabla[(1+\lambda\xi)\nabla\theta] - [(1+c\xi)\bar{v} + (1+c)\xi\bar{v}_g]\nabla\theta;$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial F_0} = \left[\frac{\nabla\theta}{Lu(1-k)(\theta-\theta_k)} - (\bar{v} + \bar{v}_g) \right] \nabla\xi + \frac{Lu(\partial\theta/\partial F_0 + \bar{v}_g\nabla\theta) - \Delta\theta}{Lu(1-k)(\theta-\theta_k)} (1-\xi); \quad (2)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial F_0} = Pr \nabla(\nabla\omega) - \bar{v}\nabla\omega - Pr^2 \left[(Gr_T - \frac{Gr_c}{\theta_k - \theta_c}) \nabla\theta - Ar \nabla\xi \right] \frac{\partial}{\partial g};$$

$$\Delta\psi = -\omega,$$

где $\theta = T/T_0$, $F_0 = t/t_0$, $\bar{v} = \bar{U}/U_0$ - соответственно безразмерные температура, время, скорость; $Lu = a/D_2$, $Pr = \nu_0/\alpha_2$, $Gr_T = g\beta_c T_0 X_0^3/\nu_0^2$, $Gr_c = g\beta_c C_0 X_0^3/\nu_0^2$, $Ar = g(\rho_1/\rho_2 - 1)X_0^3/\nu_0^2$, $W = L/c_2 T_0$ - числа Льюиса, Прандтля, тепловое число Грасгофа, концентрационное число Грасгофа, чис-

ло Архимеда и критерий темпа кристаллизации; L - теплота кристаллизации; ν - кинематический коэффициент вязкости; $c_2 = 1 + c - Wd\xi/d\theta$ - эффективный коэффициент теплоемкости; $c = c_1 \rho_1 / c_2 \rho_2 - 1$; $\lambda = \lambda_1 / \lambda_2 - 1$; k - равновесный коэффициент распределения примеси; \bar{v}_2 - средняя скорость жидкой фазы в ДФЗ; θ_k, θ_2 - температуры кристаллизации железа и ликвидус стали.

Область определения уравнений: для θ - вся зона системы до внешней поверхности изложницы; для ξ - зона между поверхностью слитка и границей ликвидус; для ω, ψ - вся незатвердевшая часть слитка до границы выливаемости включительно.

На поверхности расплава задается поток $\bar{q} = \bar{q}(F_0)$ по схеме, моделирующей действие экзотермической смеси. На внешней поверхности изложницы:

$$(\bar{n} \cdot \bar{q}) = Bi(\theta)(\theta - \theta_{cp}); \quad Bi(\theta) = 2.75\theta^2 + 0.7\theta + 0.1, \quad (3)$$

где \bar{n} - нормаль к поверхности изложницы, $Bi(\theta)$ - критерий Био, аппроксимирующий универсальную зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры. Таким образом, для краевой задачи достаточен минимальный набор условий, определяющих характер связей с внешней средой.

В теплокинетической части модели в сравнении с квазиравновесной теорией В.Т.Борисова принято оправдывающее себя предположение только лишь о равновесии жидкой фазы с поверхностью растущих кристаллов. Процедура формулировки общей модели сведена в четырехуровневую структурную схему.

Любое высокоинтенсивное конвективное течение характеризуется сложной структурой. Необходимость отдельного рассмотрения тепловой конвекции при высоких начальных перегревах в промышленных слитках вызвана тем, что числа Gr_r могут достигать в этих случаях критических значений ($Gr_r \sim 10^9$), соответствующих переходному режиму конвекции. На начальном этапе затвердевания практически единственной движущей силой является горизонтальный градиент температуры, при этом фронт кристаллизации достаточно гладкий и имеет простую

форму, повторяющую геометрию изложницы. Это позволяет, трансформируя общую модель в частный случай, провести мероприятия, позволяющие существенно повысить точность и надежность получаемых полей скорости и температуры. Заменяя кинетическое уравнение законом затвердевания в форме $\dot{\epsilon} \sim \sqrt{\dot{\epsilon}}$, хорошо описывающем кинетику продвижения фронта на начальных стадиях процесса, систему уравнений общей модели сводим к системе:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial F_0} &= P_r \Delta \omega - \bar{v} \nabla \omega - P_r^2 Gr_T \frac{\partial \theta}{\partial X_1}; \\ \frac{\partial \theta}{\partial F_0} &= \Delta \theta - \bar{v} \nabla \theta; \quad \Delta \psi = -\omega. \end{aligned} \quad (4)$$

Вводятся новые переменные

$$\xi_1 = \frac{X_1}{\epsilon_1(F_0)}; \quad \xi_2 = \frac{X_2}{\epsilon_2(F_0)}, \quad (5)$$

где $\epsilon_2(F_0)$ и $\epsilon_1(F_0)$ - безразмерные координаты вертикального и горизонтального фронтов затвердевания. Область конвекции отображается на единичный квадрат, границы которого остаются уже неподвижными, что значительно повышает устойчивость решения при численной реализации.

Третья глава содержит описание конечно-разностной схемы, аппроксимации граничных условий, структуры вычислительного алгоритма, а также методики и алгоритма расчета конфигурации усадочных раковин. Для конечно-разностного решения поставленной задачи использованы: метод Писмена-Рекфорда или метод переменных направлений (МПН), итерационный МПН, интегро-интерполяционный метод, метод возмущенных коэффициентов и метод прогонки. Итерационный МПН применяется для решения двумерного уравнения Пуассона. Используются монотонные разностные схемы А.А.Самарского на неравномерной расчетной сетке для параболических уравнений общего вида. Все граничные поверхности моделируются на сетке "ступеньками", поэтому аппроксимация условий фактически проводится на поверхностях, параллельных координатным плоскостям.

Граничные условия для ω получены отдельно (в связи с кри-

волинейностью границы выливаемости Γ_B) для направлений Ox_1 и Ox_2 разложением ψ в ряд Тейлора около точек границы Γ_B :

$$\omega_{I,J} = - \left[\frac{\partial \psi_{I,J-1}}{\partial x_2^2} + \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x_2^2} \right)_{I,J} \right]; \quad \omega_{I,J} = - \left[\frac{\partial \psi_{I-1,J}}{\partial x_1^2} + \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x_1^2} \right)_{I,J} \right], \quad (6)$$

где I, J - индексные координаты граничных узлов сетки. Число узлов, приходящихся на незатвердевшую часть расплава, постепенно сокращается, поэтому I, J для всех точек Γ_B определяются на каждом временном слое.

Для расчета высокоинтенсивной конвекции применяется специальный метод определения ω на границе, идея которого состоит в том, чтобы граничные условия для ω ставить не на жесткой границе фронта кристаллизации, а около него на расстоянии одного сеточного шага. Другая особенность метода - на каждом временном слое происходит подправление функции тока около фронта кристаллизации по формуле

$$\psi_2 = \psi_3/4 - \psi_4/9, \quad (7)$$

полученной из четырехточечной аппроксимации 3-го порядка точности условия прилипания $\partial\psi/\partial n = 0$.

Для расчетов затвердевания по общей модели и модели с тепловой конвекцией в переходном режиме алгоритмы и программы разрабатывались отдельно. Это вызвано необходимостью минимизации объема вычислительных работ и различиями численной реализации этих моделей, отраженных в двух приведенных блок-схемах. Алгоритм расчета затвердевания по общей модели структурно может быть разделен по функциональным признакам на три части: теплокинетическую, гидродинамическую и обрабатывающую. Теплокинетическая часть задачи имеет циклическую структуру из-за нелинейности уравнения теплопереноса. В итерационный процесс включено и уравнение баланса ξ^t . В обрабатывающей части вычисляются различные контрольные функционалы, характеризующие ход затвердевания.

Расчет конфигурации открытой усадочной раковины осуществляется на основе данных о кинетике и распределении доли твердой фазы,

которые получены из вычислительного эксперимента. Малые температурные градиенты около вертикальной оси слитка позволяют рассчитывать параметры закрытой раковины после окончания расчета затвердевания.

В основу методики положено интегральное уравнение баланса массы:

$$\int_0^{\Gamma_n^k} \rho(\xi^k) dV = \int_0^{\Gamma_B^{k+1}} \rho(\xi^{k+1}) dV + \int_{\Gamma_B^{k+1}}^{\Gamma_n^{k+1}} \rho(\xi^{k+1}) dV + \int_{\Gamma_n^{k+1}}^{\Gamma_n^k} \rho(\xi_n) dV, \quad (8)$$

где k и $k+1$ - номера двух смежных временных слоев, из которых на последнем происходит выполнение (8); $\rho(\xi^k) = \xi^k \rho_1 + (1 - \xi^k) \rho_2$; $\rho(\xi^{k+1}) = \xi^{k+1} \rho_1 + (1 - \xi^{k+1}) \rho_2$; $\rho(\xi_n) = \xi_n \rho_1 + (1 - \xi_n) \rho_2$; Γ_B и Γ_n - границы выливаемости и питания, которые определяются по соответствующим значениям ξ_B и ξ_n . Искомой величиной является вертикальная координата зеркала расплава, значение которой выбирается таким образом, чтобы на некотором интервале ($k, k+1$) удовлетворялось уравнение (8). Для значительного повышения точности вычислений перед численным интегрированием (8) проводится пространственная линейная интерполяция со схемной сетки на интерполирующую с высокой разрешающей способностью (50x200). На последней и строится разностный аналог (8) и проводится расчет конфигурации раковин. Существенным достоинством метода является универсальность и предельно минимальный перечень исходных параметров: необходимо иметь только последовательную развертку поля ξ и величин плотностей ρ_1, ρ_2 . В данном методе именно через поле ξ осуществляется учет всего многообразия факторов, описанных в общей модели.

Четвертая глава посвящена численному исследованию процесса формирования слитка в условиях естественноконвективного движения расплава. Объектом моделирования являлись слитки спокойной стали СтЗсп массой 3 и 8 т, ушеренные книзу и кверху (3т).

Переходный режим тепловой конвекции изучался для 8-тонного слитка при начальном перегреве до 50 К. Расчетом выявлено быстрое

развитие в жидком ядре течения, характеризующегося образованием около фронта кристаллизация системы крупномасштабных вихрей с регулярной структурой. Вихри, образуясь в головной части в зоне соприкосновения нисходящих и восходящих потоков, двигались со средней скоростью опускания 7 см/с . Значения вертикальной компоненты скорости в нисходящем потоке достигали 0.5 м/с . Компоненты скорости и температура имели ярко выраженный пульсационный характер.

Опускающиеся вихри вливаются в мощный придонный вихрь, который, занимая до 25% высоты тела слитка, существует на протяжении всей активной фазы конвекции. Влияние этого вихря на тепловое поле выразилось в образовании около фронта в нижней половине слитка узкой зоны с повышенной температурой. Расчет показал, что после 7 мин регулярная структура течения практически вырождается, т.е. при сохранении многоячейности прекращается опускание вихрей. Такие особенности конвекции в переходном режиме резко увеличивает эффективные значения коэффициентов переноса у фронта кристаллизации.

Развитие тепловой конвекции на протяжении всего периода затвердевания уширенного низу слитка (8т) рассмотрено при начальном перегреве 10 К . Регулярное опускное движение вихрей в этом случае не наблюдалось. Формирование ячейки структуры течения начиналось уже на стадии разгона путем образования малых локальных вихрей у корковой зоны, где температурный градиент достигает $3 \cdot 10^3 \text{ К/м}$. Вихри максимальной интенсивности группируются в подприбыльной и центральных частях слитка, их центры дрейфуют около своих средних положений, сами вихри спонтанно сливаются и распадаются. У дна при спаде интенсивности движения образуется и некоторое время существует мощный вихрь, который быстро вырождается из-за отсутствия его подпитки кинетической энергией вышерасположенных вихрей, как это происходило при высокоинтенсивной конвекции.

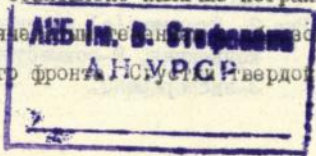
Стадия ползущего течения начинается после $\sim 15 \text{ мин}$ и характеризуется отсутствием многовихревой структуры, а также малой интен-

сивностью движения. Зоны с максимальными значениями функции тока локализируются теперь в подпризмальной части.

При моделировании затвердевания 3-тонных слитков с малым перегревом вне зависимости от знака конусности также наблюдалось образование нерегулярной системы вихрей. Таким образом, сам факт возникновения мультячейстого течения при тепловой конвекции не зависит от начального перегрева и обусловлен, в первую очередь, относительной высотой слитка.

С динамикой поля скорости тесно связаны изменения температурного поля. По мере развития конвекции охлажденный расплав в составе восходящих потоков проникает вдоль оси слитка до половины его высоты. После достижения потоками максимума интенсивности тепловой пограничный слой у вертикального фронта затвердевания начинает разрушаться, что проявляется выбросами изотерм от фронта. Одновременно с увеличением числа выбросов происходит их трансформация в узкие вытянутые зоны ("языки") с более низкой температурой, которые достигали даже оси слитка (рис.1)

Совместно протекающая тепловая и гравитационная конвекция моделировалась также при перегреве 10 К. Расчеты показали, что двухфазные потоки начинают развиваться в донной части слитка после 10 мин от начала затвердевания и, постепенно распространяясь к головной части, к 30 мин охватывают практически все тело слитка. В отличие от чисто тепловой конвекции не удается провести четкого разграничения по времени активной фазы и стадии ползущего течения. Совместная конвекция характеризуется более длительным удержанием своей ячеистой структуры, что можно объяснить отсутствием диффузионного механизма распространения твердой фазы. В связи с этим после снятия перегрева течение в жидком ядре приобретает много общих черт с течением в вертикальном слое при $R_p \gg 1$. Установлено наличие пограничного слоя для ξ , который разрушается ячеистой структурой выбросов твердой фазы от вертикального фронта. Отсутствие твердой фазы



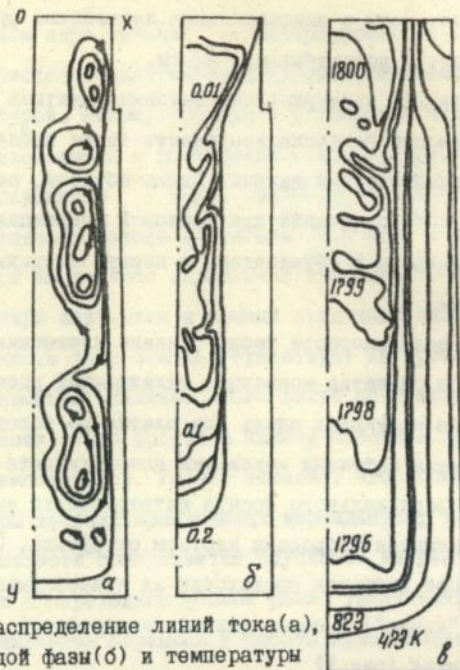


Рис.1. Распределение линий тока (а), твердой фазы (б) и температуры (в) при совместной тепловой и гравитационной конвекции.

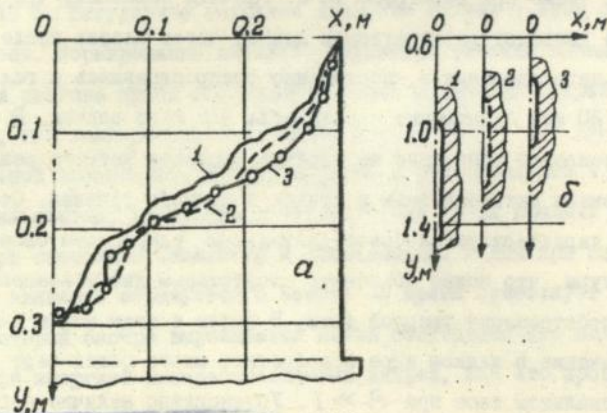


Рис.2. Открытие (а) и закрытие (б) усадочные раковины: 1-тепловая конвекция, 2-совместная тепловая и гравитационная конвекция, 3-эксперимент.

не "рассасываются" диффузионным путем и длительное время мигрируют в ядре слитка (рис.1).

Результаты расчетов сопоставлялись с известными экспериментальными данными для промышленных слитков и отмечено хорошее согласование между ними.

Анализ теплового взаимодействия между прибыльной частью и телом слитка показал, что в течении первых нескольких минут полный тепловой поток через границу прибыль-тело имеет направление к прибыльной части. Это означает, что на этом интервале прибыльная часть является потребителем теплосодержания тела слитка. Причина - отрицательный тепловой баланс между нисходящими и восходящими конвективными потоками. В дальнейшем тепловой поток изменяет свое направление на обратное.

При расчетах оценка роли и вклада конвективного теплопереноса производится путем сравнительного анализа с контрольными безконвективными вариантами. Конвекция играет значительную роль в перестройках температурного поля именно в незатвердевшей части слитка. Конвективный теплоперенос в целом значительно снижает теплосодержание жидкого ядра по всей высоте слитка, оказывая сильное влияние и на сам характер его распределения. В отличие от безконвективного варианта увеличивается перепад теплосодержания между прибылью и телом слитка, что вызвано тепловой подпиткой прибыли на начальной стадии осевыми восходящими потоками и общей интенсификацией теплопереноса в поперечном направлении в жидком ядре. Оптимальному режиму затвердевания соответствует такой ход процесса, при котором охлаждение расплава в прибыли происходит по безконвективному варианту, чему препятствует наличие гидродинамической связи между этими частями слитка.

В пятой главе приводятся результаты исследования влияния теплофизических и геометрических параметров вкладышей на формирование усадочных раковин. В этой связи рассматривается влияние тепловой

и гравитационной конвекции на кинетику затвердевания, которая определяет форму и глубину раковин.

Сопоставление с безконвективными вариантами расчета затвердевания показывает, что естественная конвекция для слитков различной массы в среднем сокращает время полного затвердевания тела слитка на 10–15 %, при этом теплофизические свойства вкладышей и их высота существенного значения не имеют. Учет только тепловой конвекции дает хорошее совпадение периодов интенсивного роста ДФЗ, но ширина ее завышена в сравнении с соответствующими опытными данными. С другой стороны, при неподвижном расплаве ширина ДФЗ очень мала. Учет гравитационной конвекции привел к хорошему согласованию данных расчета и эксперимента.

Для формы открытой раковины имеет значение различия в темпах прироста твердой фазы в зависимости от высоты слитка. Наиболее интенсивный рост твердой фазы наблюдается в донной части, наименее — в прибыльной. В отличие от безконвективного затвердевания при тепловой конвекции основная масса твердой фазы до границы выливаемости образовалась к 40 мин. Двухфазные потоки усиливают различия в темпах прироста, что продлевает состояние текучести металла в прибыльной части.

При расчетах использовались параметры шамотного и асбесто-оливяного вкладышей. В обоих случаях тепловая конвекция в сравнении с безконвективным случаем уменьшает глубину открытой раковины и снижает толщину боковых стенок по периферии раковины. Форма осевой лунки, как показал расчет, зависит от расположения точки смыкания боковых фронтов питания. Утепление, изменяя знак конусности боковых фронтов питания, создает на них точки перегиба — предшественников "моста". Конвективные потоки, как и усиление теплоизоляции, сдвигает эти точки вниз от прибыльной части. Аналогичное воздействие оказывает увеличение высоты вкладышей. Показано, что при утеплении шамотом и отсутствии конвекции точки перегиба оказались

в зоне утеплителя, вследствие чего произошло слияние открытой и закрытой раковин.

Влияние двухфазных потоков выразилось в образовании поверхности раковины, лежащей ниже, чем при чисто тепловой конвекции (рис.2). Анализ показал, что снос твердой фазы из прибыли в тело, с одной стороны, замедляет продвижение фронта от вкладышей, с другой — не приводит к увеличению скорости опускания зеркала расплава. Фиксация точек поверхности раковины на уровне зеркала происходит ближе к вкладышам чем при чисто тепловой конвекции. Экспериментальные данные подтверждают эти результаты моделирования.

Воздействие двухфазных потоков на формирование закрытой раковины проявляется в сокращении снизу закрытой области с незатвердевшим металлом за счет слоя осаждения твердой фазы (рис.2).

Между телом слитка и его прибылью существует тепловая связь, обусловленная кондуктивными и конвективными потоками. При затвердевании в тело передается 10–20% исходного теплосодержания прибыли, что можно использовать как резерв для улучшения работы утеплителя.

Общий анализ результатов работы показал, что наиболее благоприятные условия формирования слитка с позиций гидродинамики должны заключаться в следующем: конвекция в прибыльной части отсутствует или ее интенсивность минимальна; течение в теле слитка организовано таким образом, чтобы в движение последовательно включались зоны жидкого ядра в направлении от дна к верхней границе тела; гидродинамическая связь между прибыльной частью и телом отсутствует. Исходя из этих условий предложен тип утеплителя, сформированного консольными вкладышами, которые в целом отвечают перечисленным требованиям. Сравнительный анализ показал, что применение консольных вкладышей позволяет сократить высоту прибыльной части до 20% относительно высоты утеплителя, сформированного линейными вкладышами.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана с использованием методов осреднения математическая модель процесса формирования слитка спокойной стали в системе изложница-затвердевающий расплав-утепляющая конструкция. В модели учитывается: а) наличие двухфазной зоны с разделением ее на жидко-текучую и твердо-жидкую части; б) тепловая конвекция в жидком ядре слитка; в) гравитационная конвекция, обусловленная развитием двухфазных потоков, и осаждение свободных кристаллов; г) теплоперенос в изложнице и утепляющих элементах; д) теплообмен всей системы с окружающей средой; е) конфигурация системы. На базе конечно-разностных методов разработаны алгоритм и комплекс программ для численной реализации алгоритма.

2. Построены модель и алгоритм для расчета скоростных и температурных полей при высокоинтенсивной тепловой конвекции в затвердевающем слитке, использующиеся при моделировании конвективного теплопереноса в переходном к турбулентности режиме.

3. Разработан метод и алгоритм расчета конфигурации и положения открытых и закрытых усадочных раковин в затвердевшем слитке. Расчет проводится при выделении границ выливаемости и питания.

4. Выполнены численные исследования процесса затвердевания в системе слиток-изложница-утеплитель-окружающая среда, на основании которых установлена подробная схема развития и функционирования естественноконвективного процесса, включая развитие двухфазных течений и осаждение твердой фазы.

5. Выполнены исследования по выявлению механизма влияния конвективных потоков различной природы на формирование открытых и закрытых усадочных раковин.

6. Установлены основные требования к оптимальной организации естественноконвективного движения, главным из которых является необходимость блокирования гидродинамической связи между прибыльной

части и телом слитка. Предложен консольный тип вкладышей для формирования головной части уширенного кизу слитка.

Содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Петренко С.С., Борнацкий И.И. Математическая модель кристаллизации стальных слитков в условиях тепловой конвекции и движения твердой фазы // Изв.вузов. Черная металлургия. - 1988. - № 1. - С. 166-167.
2. Петренко С.С., Троянский А.А. Влияние консольных вкладышей на формирование открытой усадочной раковины // Проблемы повышения качества металлопродукции по основным переделам черной металлургии. Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Днепропетровск: Черметинформ., 1989. - С. 65.
3. Недопекин Ф.В., Петренко С.С., Поляков В.Ф. и др. Развитие конвективных течений в затвердевающем слитке // Изв.вузов. Черная металлургия. - 1984. - № 9. - С. 45-48.
4. Загородний П.Ф., Недопекин Ф.В., Пых И.Л., Петренко С.С. Численное исследование тепловой конвекции затвердевающего расплава в турбулентном режиме / Ред. журн. ИММ. - Донецк, 1980. - 12 с. - Деп. в ВИНТИ 10.06.80, № 5304.
5. Недопекин Ф.В., Петренко С.С. Влияние турбулентной естественной конвекции на процессы переноса в затвердевающем слитке // Пути повышения качества продукции литейного производства. - Киев: ИЦЛ АН УССР, 1981. - С. 4-5.
6. Недопекин Ф.В., Петренко С.С. Математическая модель кристаллизация бинарных расплавов // Изв.вузов. Черная металлургия. - 1982. - № 7. - С. 158.
7. Недопекин Ф.В., Петренко С.С. Расчет глубины и формы усадочной раковины // Изв.вузов. Черная металлургия. - 1983. - № 7. - С. 150-151.
8. Недопекин Ф.В., Петренко С.С. Конечно-разностное решение сопряженной задачи теплопереноса, естественной конвекции и затверде-

- вания // ИФЖ. - 1984. - Т.47, № 2. - С. 286-293.
9. Петренко С.С., Курдюков Д.А. Влияние конусности изложницы на интенсивность естественной конвекции / Донецкий гос. ун-т. - Донецк, 1984. - 6 с. - Деп. в УкрНИИТИ 07.12.84, № 1348.
 10. Недопекин Ф.В., Петренко С.С., Грунский В.И. Численное исследование двухфазной области при кристаллизации бинарного расплава / Донецкий гос. ун-т. - Донецк, 1984. - 7 с. - Деп. в УкрНИИТИ 09.12.84, № 1350.
 11. Недопекин Ф.В., Петренко С.С. Влияние турбулентной конвекции на процесс переноса в затвердевающей слитке // Теоретическая и прикладная механика. - Киев; Донецк: Вища школа, 1984. - Вып.15. - С. 131-135.
 12. Недопекин Ф.В., Петренко С.С., Белоусов В.В. Сопряженная задача теплообмена и гидродинамики в затвердевающем бинарном расплаве // Теплообмен. - Минск: ИТМО АН БССР, 1984, - Т.1, Ч.2 - С. 128-132.
 13. Недопекин Ф.В., Петренко С.С. Математическое моделирование гидродинамических и теплофизических процессов в системе затвердевающей расплав - изложница - утепляющий вкладыш // Теплофизика высоких температур. - 1985. - Т.23, № 3. - С. 549-555.
 14. Недопекин Ф.В., Петренко С.С., Поляков В.Ф., Миневич В.Я. Влияние естественной конвекции на формирование усадочных раковин в стальном слитке // Изв. вузов. Черная металлургия. - 1986. - № 5. - С. 35-39.
 15. Недопекин Ф.В., Петренко С.С., Поляков В.Ф., Миневич В.Я. Влияние естественной конвекции на затвердевание упрочненных снизу слитков спокойной стали // Изв. АН СССР. Металлы. - 1985. - № 5. - С. 64-69.
 16. Недопекин Ф.В., Петренко С.С., Поляков В.Ф. Математическое моделирование кинетики затвердевания и формирования усадочных раковин в системе слиток - изложница - вкладыш // Разливка стали

в слитки. - Киев: ИИЛ АН УССР, 1987. - С. 36-37.

17. Белоусов В.В., Недопекин Ф.В., Петренко С.С. Затвердевание отливки с легкоотделяемой прирубью // Теоретическая и прикладная механика. - Харьков: Вища школа, 1989. - Вып. 20. - С.103-106.
18. Петренко С.С., Троянский А.А. Применение вычислительного эксперимента для управления качеством слитка // Проблемы повышения металлопродукции по основным переделам черной металлургии. Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Днепропетровск: Черметинформ., 1989. - С. 68-69.



Подп. в печать 31.07.92. Формат 60x84 1/16. Бумага типографская.
Офсетная печать. Усл. печ. л. 1.39. Усл. кр.-отт. 1.62. Уч.-изд. л. 1.20.
Тираж 100 экз. Заказ № 9-7263.

Донецкий политехнический институт, 340000, Донецк, ул. Артема, 58.

ДМАПШ, 340050, Донецк, ул. Артема, 96

468484

AB 25.899

AB 25.899