

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

УДК 746.04:669.11-41
на правах рукописи

ТАРАСЕВИЧ НИКОЛАЙ ИВАНОВИЧ

**ФОРМИРОВАНИЕ СЛИТКОВ И ОТЛИВОК ПРИ РЕГУЛИРУЕМОМ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

05.16.02 - металлургия черных металлов

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**



Киев-1997

Работа выполнена в Физико-технологическом институте металлов и сплавов Национальной академии наук Украины

НАУЧНЫЙ КОНСУЛЬТАНТ:

доктор технических наук,
Демченко В.Ф.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

доктор технических наук,
академик Академии технологических наук
Жадкевич М.Л.

доктор технических наук, профессор
Поляков В.Ф.

доктор технических наук
Дубоделов В.И.

ВЕДУЩЕЕ ПРЕДПРИЯТИЕ :

- Институт технической теплофизики НАН Украины (г.Киев)

ЗАЩИТА состоится "10" 07 1997г. в 14 час. на заседании специализированного ученого совета Д01.97.01. в Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАН Украины по адресу: 252680, г.Киев-142, пр.Вернадского 34/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технологического института металлов и сплавов НАН Украины.

Автореферат разослан "9" 07 1997 г.

Ученый секретарь специализированного
ученого совета, доктор технических наук

 **Е.Г.Афандиянц**

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00751147 (P)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Теплофизика технологических процессов формирования слитков и отливок связана с широким кругом научных проблем, которые носят фундаментальный характер. Проведение теплофизических исследований позволяет раскрыть механизмы их формирования, установить влияние различных видов внешних воздействий на качество литейной продукции. Информация подобного рода является актуальной при создании новых технологий, а также при поиске путей оптимизации существующих.

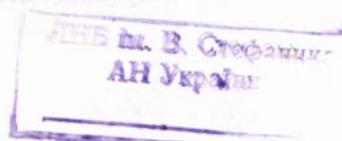
Учитывая современное экономическое положение Украины и наличие большого количества металлургических предприятий на ее территории актуальными являются исследования, направленные на разработку ресурсосберегающих технологий с низкими энергозатратами.

При проведении теплофизических исследований можно использовать несколько методов: экспериментальный и метод математического моделирования совместно с вычислительным экспериментом.

Экспериментальные методы предполагают создание лабораторного оборудования, которое, зачастую, не снимает проблему информационного обеспечения технологии, так как переход к промышленной технологии связан с изменением влияния геометрических, массовых и энергетических характеристик, которые, в силу нелинейности процессов, не всегда можно прогнозировать для заводских условий. Возможности этих методов также ограничены в силу высоких температур, агрессивности среды, значительных временных и материальных затрат.

Сегодня в практике научных исследований широко применяются методы математического моделирования и вычислительный эксперимент. Они позволяют значительно расширить возможности исследования физических явлений и процессов, присущих различным технологическим схемам производства слитков и отливок. Использование этого подхода позволяет исследователю оперативно анализировать альтернативные решения.

В настоящей диссертационной работе математические методы и вычислительный эксперимент направлены на исследование технологических процессов производства слитков, отливок и литых композиционных материалов. Основной упор сделан на изучение процессов нагрева, плавления, затвердевания и охлаждения.



Технологии производства слитков и отливок, как объект теплофизических исследований, представляют собой комплекс сложных задач тепломассопереноса, гидродинамики, термодинамики, которые характеризуются временной и пространственной разномасштабностью протекающих процессов.

Среди разнообразных задач теплофизики технологических процессов получения слитков и отливок можно выделить в качестве основных следующие:

- изучение изменения тепловых потоков с поверхности слитков и отливок в процессе их формирования;
- установление связи технологических, энергетических и геометрических характеристик с формированием температурных полей и скоростями затвердевания;
- оценка параметров управления процессами формирования слитков и отливок и выяснение их эффективности для различных технологических схем;
- изучение тепловых процессов при производстве слитков, получаемых методами специальной электрометаллургии.

Практически эти задачи определили цель настоящей работы.

Целью работы является разработка методов математического моделирования (математических моделей, вычислительных алгоритмов, программного обеспечения) для исследования теплофизических процессов производства однородных и гетерогенных слитков и отливок. Установление качественного и количественного влияния технологических, теплофизических и геометрических параметров на процессы тепломассопереноса, которые могут быть использованы для поиска новых технических решений, проектирования новых технологий и управления технологическими процессами.

С этой целью были :

- сформулированы математические модели тепло- и массопереноса в многосвязной области при наличии сосредоточенных и распределенных воздействий различного рода, с учетом фазовых превращений и других факторов, приводящих к разрывным решениям;
- проведены теплофизические исследования процессов формирования слитков и отливок, получаемых по различным технологическим схемам, и предложены рекомендации, направленные на совершенствование существующих и проектирование новых технологических процессов и оборудования;
- исследованы особенности энергетического воздействия при получении однородных и гетерогенных слитков;

- разработаны комплексы прикладных программ для расчета на ПЭВМ тепловых процессов при формировании слитков и отливок.

Научная новизна :

- сформулированы общие подходы применения методов математического моделирования и вычислительного эксперимента для исследования процессов теплопереноса при получении слитков и отливок по различным технологическим схемам ;
- проведен анализ условий теплообмена на границе "форма-отливка";
- проведен анализ изменения интенсивности теплопередачи от жидкого ядра затвердевающего металла и найдены эффективные методы управления процессом затвердевания за счет внешнего теплоотвода;
- получены новые результаты влияния теплофизических и технологических факторов на тепловое состояние и процессы формирования слитков и отливок, получаемым по различным технологическим схемам и разработаны рациональные режимы их производства.

Достоверность полученных результатов обусловлена использованием фундаментальных положений механики сплошной среды, совпадением результатов расчета с данными натурных экспериментальных измерений, а также эффективностью использования полученных практических рекомендаций при разработке и улучшении технологии производства слитков и отливок.

Теоретическая ценность. Раскрыты теплофизические особенности формирования слитков и отливок, которые получают в условиях регулируемого теплофизического воздействия.

Математические модели, программное обеспечение и результаты теплофизических исследований могут быть использованы:

- при оценке эффективности управляющих воздействий и выборе оптимальных режимов производства слитков и отливок, полученных по различным технологическим схемам;
- при разработке новых литейных технологий;
- в базе знаний экспертных систем;
- в системах автоматизированного проектирования и управления технологическими процессами.

Практическая значимость. Предложены рекомендации по выбору технологических параметров, которые снижают себестоимость литейных изделий и обеспечивают повышение их служебных и физико-механических свойств. Результаты проведенных исследований ис-

пользовались в технологических отделах Физико-технологического института металлов и сплавов (Института проблем литья) и Института электросварки им.Е.О.Патона НАН Украины, а также в ряде научных и производственных организаций. По отдельным материалам диссертации подготовлен препринт. На предложенные технические решения выдано 4 авторских свидетельства.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались на: четырех международных конференциях, в том числе, Третьей международной конференции "Применение компьютеров в литейном производстве" (София, 1990г.); 25 Всесоюзных научно-технических конференциях, в том числе, Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы кристаллизации сплавов и компьютерное моделирование" (Ижевск, 1990г.), Всесоюзной конференции "Процессы разливки, модифицирования и кристаллизации стали и отливок" (Волгоград, 1990г.), Всесоюзной конференции "Теория и практика процессов получения биметаллических и композиционных отливок" (Киев, 1991г.), Первой Всесоюзной конференции "Математическое моделирование физико-химических процессов в энергетических установках" (Казань, 1991г.), Всесоюзной конференции "Моделирование, управление и прогнозирование в технических системах" (Владивосток, 1991г.); Всесоюзном совещании "Базы физико-химических и технологических данных для оптимизации металлургических технологий" (Днепропетровск, 1988; Курган, 1990г.); 7 семинарах с международным участием, в том числе, "Моделирование физико-химических процессов, создание банков данных, расчетно-информационных и экспертных систем в области сварки и родственных технологий" (Алушта, 1993г.), "Компьютерное материаловедение и информатизация создания новых веществ и материалов" (Алушта, 1995г.); на 10 Всесоюзных семинарах, в том числе, "Моделирование физико-химических процессов, создание банков данных, расчетно-информационных и экспертных систем в области сварки и родственных технологий" (Алма-Ата, 1993г.), школе-семинаре "Численные методы механики сплошной среды" (Красноярск, 1987г.); на 19 республиканских конференциях и семинарах, в том числе, "Применение методов математического моделирования в научных исследованиях" (Донецк, 1988г., 1990г.), "Центробежное литье - прогрессивный технологический процесс производства труб и заготовок ответственного назначения" (Киев, 1989г.), "Гидродинамика разливки стали и качество металла" (Днепропетровск, 1989г.), "Снижение металлоемкости и повышение надежности отливок" (Киев, 1990г.), "Компьютерное материаловедение и информатика в материаловеде-

нии" (Киев, 1991г.), "Нетрадиционные методы снижения металлоемкости и повышения качества отливок" (Киев, 1993г.), "Проблемы металознавства та обробки легованих сталей" (Киев, 1994г.).

На защиту выносятся:

- математические модели процессов формирования слитков и отливок, получаемых по различным технологическим схемам;
- научные основы эффективного управления процессом затвердевания жидкого металла за счет внешнего теплоотвода;
- результаты математического моделирования процессов формирования слитков получаемых в изложницах, в машинах непрерывного литья заготовок, в установках центробежного литья и методами специальной электрометаллургии;
- статистические модели, полученные в результате обработки серии вычислительных экспериментов, некоторых технологий производства слитков и отливок.

Представленная к защите работа является теоретическим обобщением результатов исследований процессов затвердевания слитков и отливок, связанных с изучением процессов теплопереноса.

Диссертация выполнялась в соответствии с тематическим планом научно-исследовательских работ ИЭС им.Е.О.Патона НАН Украины и ФТИМС (бывший ИПЛ) НАН Украины, а также ряда хозяйственных с предприятиями и НИИ Украины и стран бывшего СССР.

Публикации. По теме диссертации опубликовано один репринт, 64 статьи, 4 авторских свидетельства.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения; 5 глав, каждая из которых заканчивается выводами; заключения (основные выводы), содержащего наиболее значимые результаты и списка используемой литературы, который содержит 238 наименования. Работа изложена на 400 страницах, включая 105 рисунков, 17 таблиц и 11 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во введении обоснована актуальность, научная новизна и достоверность выполненных в диссертации исследований; сформулированы цели и задачи работы.

Первая глава посвящена анализу задач математического моделирования теплофизики технологических процессов литья, металлургии, а также специальной электрометаллургии.

Среди методов решения рассматриваемых задач можно выделить следующие: аналитические, численные, физического моделирования и измерения температурных полей реальных объектов.

Применение аналитических методов связано, как правило, с определенной идеализацией процессов, в той или иной мере отличающейся от реальных условий. Методы численного решения являются достаточно гибкими и точными в смысле полноты учета особенностей процесса, хотя и не позволяют получать решение в виде конечной формулы. Последнее является известным недостатком численных методов, так как невозможно провести априорный анализ математической модели. Однако на деле аналитическое решение почти всегда, за исключением простейших случаев, также непригодно для проведения такого анализа, а расчетные формулы зачастую бывают настолько сложны, что их числовая реализация оказывается более трудоемкой, чем реализация численных методов.

Методы физического моделирования (на электромоделях или гидромоделях) связаны со значительными трудозатратами создания самой модели, а получение характеристик одного варианта требует длительного времени. Переход от одного варианта к другому связан с переделкой модели в соответствии с новыми требованиями к параметрам задачи, что приводит к значительному увеличению продолжительности исследований.

К первым работам по исследованию затвердевания металла следует отнести работу Ляме и Клайперона "Об отвердевании охлаждающегося жидкого шара", опубликованную в 1831 году. Дальнейшее развитие вопросов кинетики продвижения фронта фазового перехода было сделано Стефаном. Показано, что продвижение фронта фазового перехода пропорционально корню квадратному от времени. Коэффициент пропорциональности, получивший применительно к литейным процессам название константы затвердевания, находят из решения трансцендентного уравнения. Это решение долгое время служило основой расчета толщины затвердевшей корки для различного рода литейных процессов, часто без всяких оснований применялось к отливкам различной конфигурации и с разнообразными схемами охлаждения. Анализ состояния теплового потока в слитках показывает, что фронт затвердевания лишь в отдельных случаях является плоским, а тепловые процессы одномерными. В некоторых работах, пренебрегая выделением скрытой теплоты кристаллизации и исходя из гипотезы о полубесконечном теле с равномерной начальной температурой граничной поверхности, использовались решения одномерной

задачи теплопроводности, которые легко можно получить из фундаментального решения.

Вейник широко использовал "уравнение квадратного корня" для расчета условий затвердевания отливок. Развитие этого подхода находим в работах Хворинова, Любова, Гершовича и др., но использование этих методов для современных технологий часто приводит к значительным ошибкам.

В последнее время получили развитие работы по применению теплофизических, физико-химических и динамических воздействий на жидкий и кристаллизующийся металл с целью управления процессами формирования слитков и отливок.

Активное воздействие на формирование структуры слитков и отливок оказывают: интенсификация тепло- и массообмена объема затвердевающего металла; воздействие на центры кристаллизации и фронт затвердевания; интенсификация физико-химических процессов. Интенсификация тепло- и массопереноса за счет механического, электромагнитного и других видов приводит к снижению толщины гидродинамического и теплового пограничных слоев и увеличению температурного градиента на фронте кристаллизации. При этом наблюдается снижение времени затвердевания слитков и отливок, уменьшается химическая макронеоднородность металла, измельчается первичное макрзерно.

Используя теорию теплопроводности можно исследовать кристаллизацию расплава; изучить закономерности формирования кристаллического строения в зависимости от скорости охлаждения, величины перегрева жидкого расплава и других характеристик; оценить влияние модификаторов, микрохолодильников, вибрации, ультразвука, электромагнитных полей и других внешних воздействий на процессы формирования слитков и отливок. При проведении подобных исследований появляется возможность оценить структурную и некоторые другие виды химической неоднородности, усадочную пористость и др.

Вычислительный эксперимент позволяет снизить себестоимость исследований, а также значительно расширить знания в исследуемой области. Особенно явно преимущество этого инструментария, когда проведение натурных экспериментов труднореализуемо или невозможно.

Проблемой моделирования тепловых процессов при затвердевании слитков и отливок занимались ряд видных отечественных и зарубежных ученых. В развитие этого направления большой вклад внесли Ефимов В.А., Борисов В.Т., Махненко В.И., Медовар Б.И.,

Демченко В.Ф., Авдонин Н.А., Журавлев В.А., Митчел А., Шекели Д., Самойлович Ю.А., Скворцов А.А., Легенчук В.И. и др. исследователи.

Значимость методов математического моделирования и вычислительного эксперимента, учитывая современные экономические и энергетические проблемы, резко возросла. Расширение области их применения является сегодня одной из важнейших задач в научных исследованиях.

Наличие неидеального контакта между теплообменивающимися поверхностями (боковая стенка слитка или отливки и стенка изложницы или формы), подвижной границы раздела фаз, воздействия концентрированных и распределенных факторов при моделировании приводит к необходимости постановки задач для уравнений теплопроводности с разрывными тепловыми потоками и температурами.

В общем случае процесс переноса тепла в слитке или отливке можно описать дифференциальным уравнением:

$$c\gamma \cdot \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{dW}{dt} \quad (1)$$

где c , γ , λ - теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности среды, которые являются функциями температуры среды; T - текущая температура; x , y , z - координаты соответствующего направления. Последнее слагаемое в уравнении (1) соответствует изменению объемной плотности теплового потока за счет внутренних источников. Для литейных процессов такими величинами могут быть удельная объемная теплота испарения, кристаллизации либо объемная плотность джоулевых источников тепла.

Скорость движения жидкого металла характеризует гидродинамическую сторону процесса теплообмена и определяется из уравнения неразрывности (2) и системы уравнений движения вязкой жидкости Навье-Стокса (3):

$$\frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \frac{\partial \omega_y}{\partial y} + \frac{\partial \omega_z}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{d\omega_x}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial \omega_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial \omega_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial \omega_z}{\partial z} \right) - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + F_x, \\ \frac{d\omega_y}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial \omega_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial \omega_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial \omega_z}{\partial z} \right) - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\partial P}{\partial y} + F_y, \\ \frac{d\omega_z}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial \omega_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial \omega_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial \omega_z}{\partial z} \right) - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} + F_z, \end{cases} \quad (3)$$

где ν - кинематическая вязкость; P, F - давление и внешняя сила рассматриваемой точки; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ - составляющие скорости вдоль соответствующих координат.

Численные значения параметров уравнений (1) - (3) зависят от распределения концентраций соответствующих элементов в расплаве. Поле концентраций i -го элемента может быть описано уравнением массопереноса, которое аналогично уравнению теплопроводности и имеет вид:

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_i \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_i \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_i \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) \quad (4)$$

где D_i, C_i - коэффициент диффузии и концентрация i -го элемента. При этом необходимо отметить, что коэффициент диффузии является функцией температуры. Граничные и начальные условия выбираются в соответствии с объектом моделирования.

Часто для решения практических вопросов нет необходимости использовать общие постановки, учитывающие комплекс физических процессов, сопровождающих переход расплава из жидкого состояния в твердое. Потому, что это требует значительных временных затрат, которые, как правило, не оправдывают решение поставленных проблем. Поэтому часто приходится обращаться к упрощенным постановкам на базе двух- и одномерных дифференциальных уравнений.

Теплообмен между изложницей и слитком является одной из важнейших проблем теплофизики формирования слитков и отливок. При заливке жидкого металла в изложницу (форму), как правило, наблюдаются большие скорости охлаждения.

После заливки жидкого металла его затвердевание обусловлено теплоотводом через стенки формы. Количество отведенного тепла определяется величиной теплового потока через границу контакта отливки с формой. В начале процесса имеет место плотный контакт жидкого металла с формой и величина теплового потока будет определяться толщиной теплоизоляционного покрытия, которое обуславливает термическое сопротивление. По мере снятия теплоты перегрева в пристеночной области образуется твердая корка металла. Вследствие усадки и под действием возникающих в ней напряжений корочка деформируется и отходит от стенки формы, вызывая образование промежутка, который является дополнительным термическим сопротивлением тепловому потоку от внутренних объемов слитка. При обычных условиях формирования отливки этот промежуток заполнен газовой смесью. Вещество, заполняющее газовый зазор, представляет собой продукты сублимации выгорания и разложения тепло-

изоляционного покрытия, газовыделений из материалов отливки (слитка) и формы (изложницы). Теплообмен в этой области связан с передачей тепла конвекцией, излучением и теплопроводностью в небольшом объеме, определяемом величиной зазора и теплофизическими свойствами поверхностных слоев.

Общее термическое сопротивление с единицы поверхности зоны контакта можно рассматривать как параллельные сопротивления:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_K} + \frac{1}{R_T} + \frac{1}{R_A} \quad (5)$$

где R_K - сопротивление, обуславливающее кондуктивный тепловой поток поверхностных слоев металла; R_T - сопротивление газовой прослойки; R_A - сопротивление, обуславливающее лучистый теплообмен в зазоре.

Их величину можно оценить по размеру газового зазора δ_z и коэффициенту теплопроводности газовой смеси λ_z . В процессе формирования слитка эти величины будут переменными, причем величина зазора является функцией времени:

$$\delta_z = \begin{cases} 0, & t < t_2 \\ \delta(t), & t > t_2 \end{cases} \quad (6)$$

(t_2 - время образования газового зазора), а коэффициент теплообмена λ_z зависит от температуры - $\lambda_z = \lambda_z(T)$.

Для расчетов при выборе теплофизических свойств зазора можно пользоваться параметрами воздуха изменяющимися от температуры и химического состава.

Вейник предлагает оценивать коэффициент внешней теплопередачи в зазоре по формуле

$$\alpha = 0.16(T_{\text{заз.}}/100)^2, \text{ [Вт/(м}^2\text{·°C)]}, \quad (7)$$

где $T_{\text{заз.}}$ - температура зазора, равная среднеарифметическому значению между температурой поверхности слитка и внутренней поверхности изложницы.

Установлено, что время начала образования газового зазора зависит от толщины отливки и внешнего давления.

Экспериментальное исследование кинетики образования зазора по изменению температурных кривых показывает, что на рабочей поверхности после достижения некоторой максимальной температуры наблюдается спад температуры до определенного минимума после чего температура поверхности формы снова незначительно возрастает. В некоторых случаях можно наблюдать снижение температуры на рассматриваемой поверхности после максимума, которое продолжается вплоть до выбивки изделия. Это, как правило, наблюдается в

условиях принудительного охлаждения, когда интенсивность теплообмена на внешней поверхности велика.

Литературные данные по оценке величины коэффициента теплопередачи "слиток - изложница" носят частный характер. Они получены для слитков определенной геометрии и конкретных технологических условий. Их использование для других условий заведомо предполагает внесение определенных ошибок при выполнении расчетов.

При формировании слитка в вакууме теплообмен между слитком и формой происходит, главным образом, путем лучеиспускания, так как непосредственный контакт металла и формы практически отсутствует, а кондуктивная теплопередача через газовый зазор возможна лишь в узких щелях после заливки жидкого металла и дегазации в щели, образовавшиеся вследствие усадки.

Процесс теплопередачи от донной поверхности листового слитка в электроннолучевых установках осуществляется в две стадии. На первой стадии, по времени совпадающей с продолжительностью затвердевания слитка, коэффициент теплопередачи изменяется в пределах $160 \div 190 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. На второй стадии процесс теплопередачи происходит в соответствии с линейной зависимостью эффективного коэффициента теплопередачи от параметра f :

$$\alpha_{\text{эф}} = 0.2875 \cdot f + 71.01, \text{ [Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})] \quad (8)$$

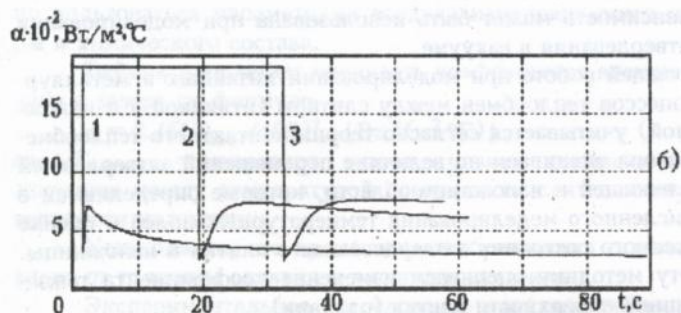
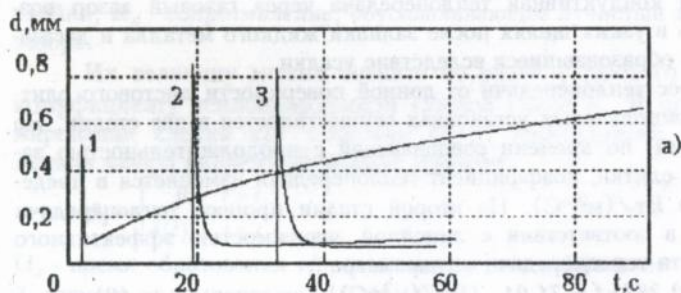
где $f = (T_c^3 + T_c^2 \cdot T_b + T_c \cdot T_b^2 + T_b^3) \cdot \sigma_0$;

Эта зависимость может быть использована при моделировании процессов затвердевания в вакууме.

В настоящей работе при моделировании литейных и металлургических процессов теплообмен между слитком (отливкой) и изложницей (формой) учитывается согласно теории контактного теплообмена. Размер зазора оцениваем по величине перемещений затвердевшей корки в прилегающей к изложнице области, которые определяются в результате численного моделирования температурных полей и оценке термонапряженного состояния затвердевающего слитка и изложницы. Используя эту методику оцениваем изменение коэффициента теплообмена с внешней поверхности слитка (отливки).

На рис.1,а показано изменение толщины газового зазора, при формировании стальной полый цилиндрической отливки с наружным диаметром - 240 мм и толщиной стенки 40 мм, при различной величине приложенного давления. Для рассматриваемой геометрии наблюдается идентичный характер формирования газового зазора. После образования твердой корки толщиной 1.5 мм при внешнем давлении 0.1 МПа через 1.5 сек образуется газовый зазор толщиной

0.51 мм, который резко снижает теплоотвод от отливки. Снижение интенсивности теплоотвода приводит к повышению температуры затвердевшей корки, увеличению ее пластичности, что обуславливает снижение величины зазора до 0.08 мм, после чего наблюдается монотонное увеличение его толщины, которое к концу затвердевания достигает 0.67 мм. При низких давлениях после деформации твердой корки величина зазора увеличивается по закону квадратного корня, высокие величины давления увеличивают продолжительность затвердевания жидкого металла в условиях плотного контакта и обуславливают линейный характер увеличения твердой корки.



Приложенное давление: 1 - 0.1 МПа, 2 - 5 МПа, 3 - 10 МПа

Рисунок 1 - Изменение толщины газового зазора (а) и коэффициента теплообмена на границе форма-отливка (б) при затвердевании отливки из стали 15Л толщиной 40 мм с внутренним графитовым стержнем при различной величине приложенного давления

Максимальное значение зазора наблюдается в момент его образования, после чего в течение 0.0165 сек его размер падает, причем с увеличением давления этот временной интервал растет. После минимума наблюдается монотонное увеличение промежутка между формой и отливкой. Изменение коэффициента теплообмена между формой и отливкой представлено на рис.1,6. Образование зазора снижает интенсивность теплоотвода в 6 - 10 раз, которая затем увеличивается до 720 Вт/(м² °С), дальнейшее нарастание твердой корки происходит при снижении интенсивности теплообмена.

Для отливок различной толщины из стали 15Л и 55Л установлена связь между временем образования газового зазора и величиной приложенного давления. Для каждой толщины существует критическое значение давления, выше которого затвердевание будет происходить при плотном контакте между отливкой и кокилем без образования газового зазора. Для отливок толщиной (δ , см) от 0.5 до 4 см величину критического давления ($P_{кр.}$, МПа) можно определить по следующим соотношениям, которые могут быть использованы для оценки рабочих диапазонов давлений при литье:

$$\begin{array}{l} \text{сталь 15Л - стержень графит} \\ P_{кр.} = 2.0801277 \cdot \delta^{2.5638} \end{array} \quad (9)$$

$$\begin{array}{l} \text{сталь 55Л - стержень графит} \\ P_{кр.} = 0.500447 \cdot \delta^{2.41061} \end{array} \quad (10)$$

При моделировании тепловых процессов важно правильно оценить эффективные характеристики гидродинамики жидкого расплава. Заливка металла в изложницу или форму сопровождается турбулентным переносом жидкости, который существует, как правило, довольно продолжительное время после окончания процесса разливки. Теплопередача от движущегося потока жидкого металла к границе затвердевания может происходить за счет внешних сил (вынужденная конвекция) или благодаря различной плотности объемов жидкого металла под действием сил тяжести (свободная конвекция). Вынужденная конвекция может быть вызвана так же силами всплывания газовых пузырей при формировании слитков кипящей стали. Конвекция перемещает объемы среды к поверхности теплообмена и способствует передаче тепла тем интенсивнее, чем больше скорость движения среды.

Для учета конвективной составляющей теплового потока необходимо решение совместной задачи тепломассопереноса и гидродинамики движения жидкого металла, которое имеет ряд алгоритмических трудностей и требует больших затрат машинного времени.

При моделировании процессов затвердевания движение жидкого металла может учитываться выбором величины эффективного коэффициента теплопроводности (λ_3). Предполагаем, что эффективная теплопроводность (λ_3) в жидком металле пропорциональна теплопроводности твердой фазы (λ_T), т.е. $\lambda_3 = k \lambda_T$, где k - коэффициент пропорциональности.

Для оценки коэффициента k процесс формирования отливки можно разбить на три этапа. Первый этап соответствует заполнению формы жидким металлом. В этом случае металл очень турбулизован и скорость его движения определяется скоростью поступающего металла или скоростью вращения формы. На этом этапе теплопередача осуществляется, в основном, за счет вынужденной конвекции. После заполнения интенсивность турбулентных потоков постепенно падает и теплоперенос осуществляется за счет конвекции и молекулярной теплопередачи. На третьем этапе, по мере снижения градиента температур, вызванного снятием теплоты перегрева и продвижением фронта кристаллизации, лимитирующим становится кондуктивный перенос тепла.

Используя безразмерные критериальные характеристики жидкого металла: Прандтля ($Pr = \nu/a$), Грасгофа ($Gr = (g l_o^3 / \nu^2) \beta \Delta T$), Рейнольдса ($Re = v l_o / \nu$), k определяли из следующих соотношений:

I, II этап

$$k = 0.45 (Pr \cdot Re)^{0.438}, \quad \text{при } (Pr \cdot Re) \leq 8600$$

$$k = 1.35 \cdot 10^{-6} (Pr \cdot Re)^{1.84}, \quad \text{при } (Pr \cdot Re) > 8600$$

III этап

$$k = 1.0, \quad \text{при } (Pr \cdot Gr) < 10^5$$

$$k = 7.94 \cdot 10^{-3} (Pr \cdot Gr)^{0.35}, \quad \text{при } 10^5 < (Pr \cdot Gr) \leq 10^7$$

$$k = 1.82 \cdot 10^{-9} (Pr \cdot Gr)^{1.3}, \quad \text{при } 10^7 < (Pr \cdot Gr) \leq 10^8,$$

(11)

где a - коэффициент температуропроводности; l_o - характерный определяющий размер; v - скорость жидкого потока; ν - кинематическая вязкость; g - гравитационное ускорение; β - коэффициент объемного расширения; ΔT - перепад температур.

В работе, на базе анализа составляющих термического сопротивления, проведена оценка эффективности управления процессом затвердевания за счет регулирования интенсивности внешнего тепловода.

В фиксированный момент времени величина теплового потока от внутренних объемов будет лимитироваться термическим сопротивлением системы: твердая корка - газовый зазор - изложница -

охлаждающая среда, которые можно представить в виде следующей суммы:

$$R(t) = R_w(t) + R_{c-w}(t) + R_c(t) \quad (12)$$

В общем случае, суммарное сопротивление (12) и все его составляющие являются изменяющимися во времени величинами.

Рассмотрим некоторые аспекты передачи тепла через указанные выше среды. Прохождение теплового потока через стенку изложницы и затвердевшую корку слитка происходит за счет теплопроводности, которая определяется теплофизическими характеристиками материала, изменяющимися во времени от температуры. На внешней поверхности изложницы в качестве охлаждающего реагента может выступать как воздух, так и охлаждающая жидкость. В случае охлаждения на воздухе, отвод тепла от боковой поверхности будет происходить за счет конвекции воздушных потоков и радиационного теплообмена, причем в зависимости от температуры поверхности происходит перераспределение доли каждой из перечисленных составляющих. С повышением температуры поверхности возрастает доля радиационного теплообмена, при температурах превышающих 1000—1200 °C эта составляющая становится лимитирующей. Тепловой поток через стенку изложницы обусловлен кондуктивным переносом тепла. Тепловой поток через газовый зазор, как указывалось выше, осуществляется механизмами радиации и теплопроводности.

Коэффициент теплопередачи через какую-либо прослойку можно представить в виде отношения коэффициента теплопроводности к ее толщине, а термическое сопротивление представляет собой величину обратную коэффициенту теплопередачи. Остальные составляющие в уравнении (12) можно оценить по величине соответствующего коэффициента теплопередачи (α) — $R = 1/\alpha$.

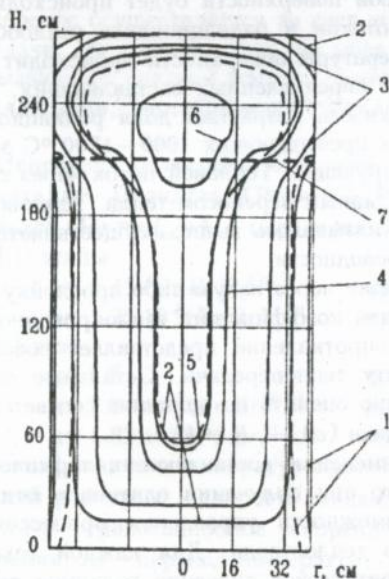
Исходя из динамики изменения составляющих термического сопротивления установлено, что при получении слитков и отливок, существуют ограниченные возможности управления процессом затвердевания за счет внешнего теплоотвода. Для каждой технологической схемы существует критическое значение толщины затвердевшей корки, выше которой увеличение величины наружного теплоотвода не будет оказывать влияния на процесс теплоотвода от внутренних объемов затвердевающего металла, а будет носить локальный характер.

Анализ затвердевания слитка массой 2.8 т показал, что интенсифицировать процесс теплопередачи можно путем уменьшения толщины стенки изложницы и применением принудительного охлажде-

ния ее наружной поверхности до тех пор, пока толщина затвердевшей корки не достигнет 14 см, после этого момента принудительное охлаждение не влияет на скорость затвердевания, а приводит к изменению температуры поверхности слитка.

При получении плоского слитка в установках электронно-лучевого переплава внешним теплоотводом можно эффективно воздействовать на процесс направленного затвердевания до образования твердой корки толщиной 7.35 см.

Во второй главе рассматриваются теплофизические процессы формирования крупных слитков, получаемых в изложницах, машинах непрерывного литья, а также методами специальной электроталлургии.



Время после заполнения изложницы жидким металлом: 1- 21 мин.; 2 - 1ч.; 3 - 2ч.; 4 - 4ч.; 5 - 5ч.; 6 - 6ч.; 7- граница прибыли

Рисунок 2 - Положение изотерм солидус (—) и ликвидус (---) в процессе затвердевания листового слитка при интенсивном перемешивании.

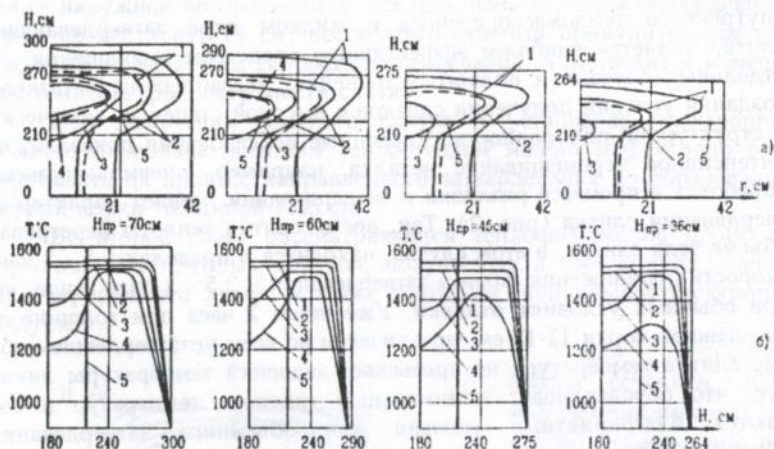
Для 30-тонного слитка сечением 200×80 (см) численными методами исследованы некоторые особенности его затвердевания. Проведен сравнительный анализ условий его формирования при заливке сифоном либо сверху и различной скорости разливки. При сифонном способе разливки металла ухудшаются условия направленного затвердевания, что приводит к большей, чем при разливке сверху, зональной неоднородности, усадочным дефектам и, как следствие, снижению качества макроструктуры слитка в целом. В значительной степени этого можно избежать за счет оптимизации гидродинамики сифонной разливки, однако интенсификация

внутреннего тепломассопереноса в жидком ядре затвердевающего слитка является наиболее эффективным средством уменьшения, а в отдельных случаях и полного устранения, указанных недостатков и создания условий получения слитков с высокой степенью химической и структурной однородности. Численные исследования показали, что интенсивное перемешивание металла, например, пневмоимпульсная обработка в процессе разлива и затвердевания, меняет характер затвердевания слитка (рис. 2). Так, время снятия теплоты перегрева в объеме тела слитка, в этом случае, находится в пределах 1.5 - 2 часа, скорость продвижения фронта затвердевания в 2.5 - 3 раза выше, чем при обычных условиях отливки. Уже через 2 часа при толщине затвердевшей корки 12-13 см, практически во всем незатвердевшем объеме слитка температура не превышает значений температуры ликвидус, что обуславливает минимальный градиент температур и создаются благоприятные условия для объемного затвердевания, обеспечивающего получение однородного по составу, кристаллическому строению и механическим свойствам слитка. В этом случае меняется и роль прибыльной части слитка, размеры которой могут быть значительно уменьшены, а отливку крупных листовых слитков представляется более целесообразным производить в уширенные к низу изложницы с теплоизоляцией верхней части вкладышами.

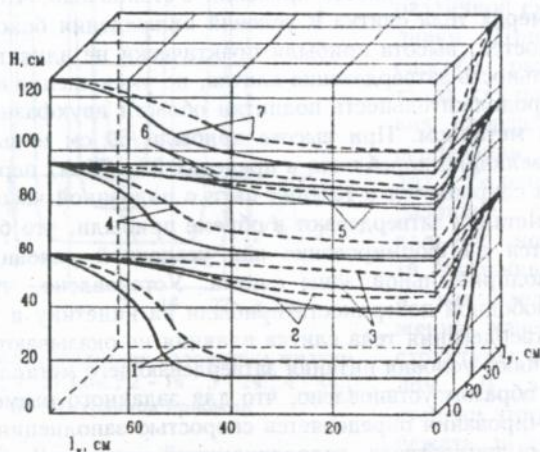
Изучена тепловая работа прибыли. Установлено, что при неизменных размерах тела слитка и условий охлаждения боковой и донной поверхностей, высота прибыли практически не влияет на общую продолжительность затвердевания слитка, но уменьшение ее размеров сокращает продолжительность подпитки области двухфазного состояния жидким металлом. При высоте прибыли 60 см и выше (практически эта величина колеблется в пределах 68 - 75 см) перегрев жидкого металла сохраняется в течении пяти с половиной часов. Последние порции металла затвердевают в объеме прибыли, что благоприятно сказывается на формировании как усадочной раковины, так и структуры подприбыльной зоны слитка. Установлено, что степень утепления свободной поверхности прибыли на кинетику и продолжительность затвердевания тела слитка влияния не оказывают, но существенно изменяют условия питания затвердевающего металла (рис. 3).

Таким образом установлено, что для заданного размера слитка процесс формирования определяется скоростью заполнения изложницы, условиями теплоотвода, гидродинамикой жидкого металла и характеристиками прибыльной надставки.

Теплофизические особенности получения крупных слитков методами специальной электрометаллургии (ЭШП, ПЭШО) изучались



Время процесса: 1 - 3 ч.; 2 - 5 ч.; 3 - 7 ч.; 4 - 8 ч.; 5 - граница прибыли.
 Рисунок 3 - Положение изотерм солидус (—) и ликвидус (---) (а) и распределение температур в прибыльных надставках различной высоты (б) в процессе затвердевания листового слитка



Время процесса: 1 - 1 ч., 2 - 2 ч., 3 - 3 ч., 4 - 4 ч., 5 - 5 ч., 6 - 6 ч., 7 - 7 ч.;
 — изотерма солидус; --- изотерма ликвидус.

Рисунок 4 - Кинетика кристаллизации слитка ПЭШО

на основе трехмерной модели переноса тепла в шлаке и кристаллизирующемся слитке. При численном моделировании учтены технологические и теплофизические особенности теплообмена с боковой поверхности слитка, а в шлаковой ванне действие распределенных тепловых источников.

Для слитков электрошлакового переплава изучено влияние режима охлаждения его боковых граней, скорости переплава, электрического режима и схемы подключения электродов, соотношения размеров узкой и широкой граней и других факторов на температурное поле, протяженность двухфазной зоны и форму металлической ванны затвердевающего слитка. Сопоставление результатов счета с макроструктурой и замерами температур поверхности слитка контактной термопарой свидетельствуют об адекватном описании математической моделью исследуемого процесса.

При порционной электрошлаковой отливке крупных кузнечных слитков изучено (рис.4) влияние размеров порций, времени их выдержки и интенсивности электрошлакового обогрева на процесс затвердевания жидкого металла

Разработанная модель и ее двухмерный вариант (с приближенным учетом переноса тепла в третьем направлении) использовалась для исследования затвердевания металла в МНЛЗ с вводом в расплав дисперсных инокуляторов.

Третья глава посвящена исследованию процессов формирования отливок центробежного литья.

Формирование центробежных отливок определяется комплексным влиянием системы параметров. Оценка действия каждого параметра на процесс формирования отливки, без учета его взаимодействия с остальными, не всегда дает возможность получить полную картину исследуемого процесса.

В работе изучено влияние температуры перегрева жидкого металла, степени утепления внутренней поверхности и геометрических характеристик формы и отливки на процессы формирования отливок.

При заполнении формы металл равномерно растекается по ее длине, что возможно при сохранении его жидкотекучести на протяжении всего времени заливки. Заливка металла в форму довольно длительно и сопровождается развитой поверхностью струи при выходе из литникового устройства ковша, что обуславливает значительные тепловые потери и приводит к снижению температуры жидкого металла в форме по сравнению с ковшом. Поэтому температура металла в ковше должна обеспечить его жидкотекучесть на протяжении всего времени заполнения формы.

Изменение температуры перегрева (ΔT) бронзовых отливок от 20 до 220 °С, а стальных от 10 до 50 °С вызывает линейное, относительно ΔT , увеличение времени снятия перегрева и полного затвердевания отливки.

Для отливки диаметром 870 мм с толщиной стенки 100 мм были получены аналитические зависимости, позволяющие оценить время снятия теплоты перегрева (τ_1) и продолжительность полного затвердевания отливки (τ_s) при различных перегревах.

$$\begin{aligned} \text{Для стали: } \tau_1 &= 0.083 \Delta T + 1.25 \text{ (мин.)} \\ \tau_s &= 0.079 \Delta T + 12.22 \text{ (мин.)} \end{aligned} \quad (13)$$

Для бронзового сплава:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= 0.026 \Delta T + 1.025 \text{ (мин.)} \\ \tau_s &= 0.033 \Delta T + 6.07 \text{ (мин.)} \end{aligned} \quad (14)$$

При центробежном литье нахождение металла продолжительное время в жидком состоянии в условиях повышенной гравитации за счет вращения формы может приводить к усиленной ликвации элементов, окислению олова в оловянных и алюминия в алюминиевых бронзах.

При высоком перегреве металл кристаллизуется объемно, длительное время находясь в жидкоподвижном состоянии. Сепарация более чистых примесей к наружной поверхности отливки способствует образованию зональной химической неоднородности. Поэтому перегрев металла при центробежном литье следует выбирать на самом низком уровне, обеспечивая технологические условия заполнения формы без образования дефектов.

Одним из важных параметров центробежного литья, который может быть использован для управления процессом кристаллизации, является толщина теплоизоляционного покрытия внутренней поверхности формы. Она обуславливает термическое сопротивление между формой и отливкой, величину которого можно оценить по толщине теплоизоляции и ее коэффициенту теплопроводности.

При получении крупногабаритных стальных отливок в качестве теплоизоляционного покрытия используют слой песка различной толщины. Увеличение его толщины приводит к увеличению времени снятия теплоты перегрева со всего объема отливки и продолжительности затвердевания стальной отливки. Уменьшение толщины теплоизоляции с 30 до 15 мм почти не меняет значения максимальной температуры внутренней и наружной поверхности изложницы, дальнейшее снижение толщины слоя с 15 до 4 мм увеличивает прогрев изложницы, особенно это сказывается на изменении температуры ее внутренней поверхности. Толщина слоя песка меньше 2 мм приводит

к резкому увеличению температуры изложницы и значительным термическим напряжениям, вызывающим ее износ.

При центробежном литье бронзовых заготовок в качестве огнеупорного покрытия формы используют графитовые краски и водяное охлаждение наружной поверхности. Продолжительность затвердевания бронзовой отливки увеличивается при увеличении толщины слоя краски при этом температура формы падает.

При выборе оптимальной толщины теплоизоляционного слоя следует исходить из условий минимальной продолжительности затвердевания заготовки и температуры формы. Проведенный анализ показывает, что таким условиям соответствует толщина песка 4-6 мм для стальной отливки, слой краски 1.5-2 мм для бронзовых отливок.

При центробежном литье затвердевание жидкого металла обусловлено теплоотводом через форму и потерями за счет радиации и конвекции со свободной поверхности. На границе "форма-отливка" из-за теплоизоляционного слоя имеет место скачек температур. После заполнения формы, различные температуры металла по ее длине приводят к неравномерной толщине твердой корки. Скорость кристаллизации жидкого металла у торца, противоположного заливке, превосходит в несколько раз скорость кристаллизации со стороны заполнения формы.

При формировании стальной отливки (Ст.35Л) толщиной 10см, длиной 850 см ($T_L = 1515^\circ\text{C}$, $T_S = 1435^\circ\text{C}$, $\Delta T = 35^\circ\text{C}$) после окончания заливки на восьмой минуте наблюдается перепад температур по ее длине. Теплоотвод через торцы формы оказывает влияние на температурное поле отливки на расстоянии 70—100 см от ее концов (рис. 5). Перепад температур по длине, на различных уровнях, составляет около 60°C . На боковой поверхности твердая корка образовалась на расстоянии 300см от правого торца формы. Остальная часть металла находится в двухфазном состоянии. Через 10 минут весь металл имеет температуру ниже ликвидуса и затвердевание происходит при развитой двухфазной зоне с концентрацией теплового центра у левого (заливочного) торца отливки. Тепловые потери со свободной поверхности превосходят интенсивность теплоотвода через боковую поверхность, что приводит к быстрому росту твердой корки в этой области. Последние объемы металла затвердевают через 30 минут, после начала заливки. Встречные фронты кристаллизации замыкаются на расстоянии 2.5—3 см от боковой поверхности отливки. Концентрацию усадочной раковины можно ожидать на расстоянии 2.5 см от наружной поверхности отливки и 50 см от левого (заливочного) торца отливки. Для избежания этого дефекта необходимо принять

меры по устранению встречного фронта затвердевания, которое может быть достигнуто снижением тепловых потерь со свободной поверхности за счет утепления ее шлаком (рис.5,6).

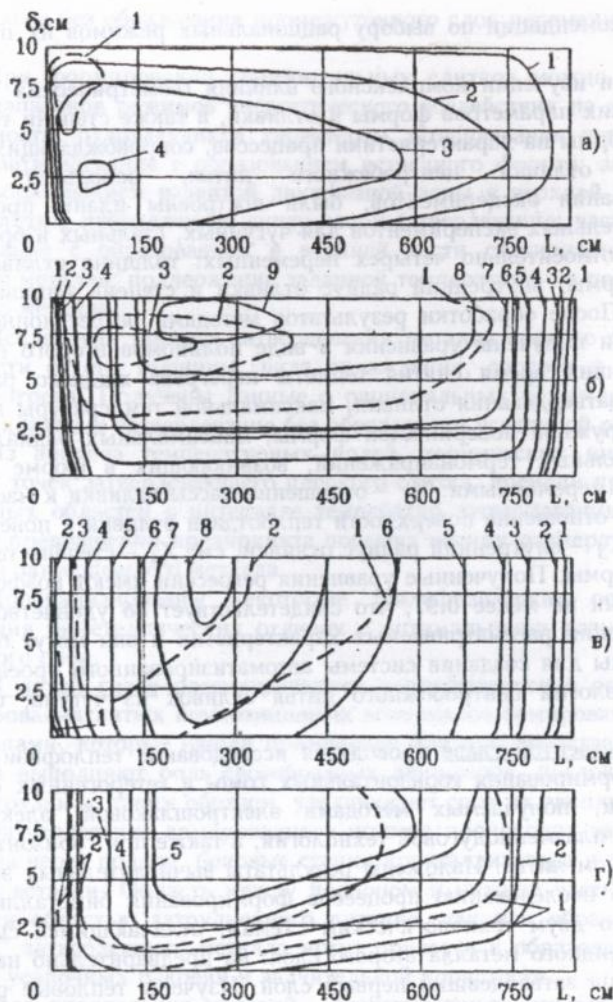
При получении отливки из бронзы ОЦ-10-2 с интервалом кристаллизации 830—980 °С жидкий металл заливают в форму при температуре 1120 °С. По окончании заливки половина залитого металла имеет температуру ниже ликвидуса. Небольшая твердая корка образуется у торцов формы (рис.5,в). Перегретый металл концентрируется у левого торца отливки, а справа - основная масса металла находится в двухфазном состоянии. Перегрев со всего объема отливки снимается через 13 минут, после чего происходит снижение температуры металла по всему объему до температуры близкой к солидусу с преимущественным продвижением фронта кристаллизации у торцов формы и замедленным ростом твердой корки у боковой поверхности. После выравнивания температуры оставшийся металл затвердевает за короткий промежуток времени. На 60 минуте вся отливка находится в твердом состоянии.

Бронза АЖНМц 7,5 - 1,5 - 2,5 - 9 заливается в форму с перегревом 140°С. Этот сплав в процессе растекания по длине отливки теряет большое количество тепла, что вызывает образование 50 см твердой корки у правого торца отливки (рис.5,г), в то время как со стороны заливки твердая корка не превосходит 20 см. За время заливки перегрев снимается с 80% объема заливаемого металла. Большие потери тепла в процессе заполнения формы вызывают значительный перепад температур по длине отливки: на свободной поверхности эта величина составляет около 100 °С, на середине толщины - 75 °С, а на наружной поверхности - 55 °С. Эти значения в несколько раз превышают аналогичные показатели для других сплавов. При затвердевании этого сплава трудно выделить область фронта затвердевания, определяемую теплоотводом через боковую поверхность.

На основании исследования теплофизических особенностей формирования длинномерных заготовок установлено, что обеспечить одинаковую скорость затвердевания металла по длине заготовки можно за счет применения дифференцированного по длине формы утепляющего слоя.

Проведен анализ перераспределения тепловых потоков при формировании центробежных отливок различной толщины в центробежных машинах, использующих формы с внутренними вставками.

Для гетерогенных заготовок, получаемых по различным технологическим схемам оценены термовременные характеристики и полу-



а), б) - сталь 35Л; в) - Бр.ОЦ-10-2; г) - Бр.АЖНМц 7,5-1,5-2,5-9;
 а) без утепления свободной поверхности флюсом; б) - г) при утеплении свободной поверхности флюсом. Время процесса (мин.): 1- после заливки жидкого металла 8 мин.; 2- 10; 3- 20; 4- 30; 5- 40; 6- 50; 7- 55; 8- 60; 9- 65.

Рисунок 5 - Положение изотерм солидус (—) и ликвидус (- - -) в процессе затвердевания центробежных отливок

чены рекомендации по выбору рациональных режимов их производства.

При изучении комплексного влияния геометрических и теплофизических параметров формы и отливки, а также степени теплоизоляции формы на характеристики процессов, сопровождающих затвердевание отливки центробежного литья, используя методы планирования экспериментов, были построены планы проведения вычислительных экспериментов для чугуновых, стальных и бронзовых отливок относительно четырех переменных: толщина отливки, толщина формы, внутренний радиус отливки и степень теплоизоляции формы. После обработки результатов методами регрессионного анализа были получены уравнения в виде полиномов второго порядка, связывающих время снятия теплоты перегрева жидкого расплава, полного затвердевания отливки, максимальной температуры внутренней и наружной поверхностей формы, максимальных радиальных и тангенциальных термонапряжений, возникающих в форме со следующими переменными: X_1 — отношение массы отливки к массе формы; X_2 — отношение поверхности теплоотдачи отливки к поверхности формы; X_3 — внутренний радиус отливки, см; X_4 — степень теплоизоляции формы. Полученные уравнения регрессии имеют коэффициент корреляции не менее 0.97, что свидетельствует об удовлетворительном описании рассматриваемых характеристик и они могут быть использованы для создания системы автоматизированного проектирования технологии центробежного литья отливок из чугуна, стали и бронзы.

В четвертой главе проводится исследование теплофизики процессов формирования горизонтальных гомо- и гетерогенных слитков и отливок, получаемых методами электрошлаковой, электроннолучевой и плазменнодуговой технологий, а также при горизонтальном непрерывном литье. Изложены результаты вычислительных экспериментов по исследованию процессов формирования биметаллических слитков по двум технологическим схемам, отличающимся способом заливки жидкого металла второго слоя: на предварительно нагретую матрицу, на затвердевший первый слой. Изучены тепловые режимы нагрева твердой заготовки в зависимости от ее толщины, удельной мощности источников нагрева (электрошлакового, электроннолучевого, плазменнодугового), ряда теплофизических и технологических факторов.

Установлена продолжительность обогрева твердой заготовки различной толщины от удельной мощности источников нагрева. Даны рекомендации по режимам нагрева матрицы, обеспечивающим сплав-

ление слоев без образования промежуточного слоя переменного состава.

При формировании горизонтальных слитков можно выделить пять диапазонов режимов энергетического воздействия на свободную поверхность, отличающихся характером затвердевания жидкого металла: затвердевание с образованием встречного фронта; затвердевание с образованием развитой двухфазной зоны в верхней и нижней части слитка; направленное снизу вверх затвердевание; частичное затвердевание с образованием в верхней части стационарной ванны жидкого металла; поддержание заданной температуры на поверхности жидкого металла.

Исследован процесс затвердевания металла первого слоя в зависимости от его толщины, вида охлаждения, способа и интенсивности нагрева. Получены данные о рациональных режимах нагрева, обеспечивающих затвердевание без образования усадочной раковины.

Из анализа температурных полей, термических циклов различных точек затвердевающего плоского слитка, времени пребывания различных областей в интервале температур затвердевания и структурных превращений предпринята попытка оценки размера структурных зон затвердевшего металла.

Проанализированы некоторые теплофизические особенности получения биметаллических отливок с оптимальными размерами переходного слоя.

В пятой главе рассматриваются теплофизические особенности формирования литых композиционных материалов армированных макрораставками, которые нашли применение при производстве штампов, где они выполняют роль своеобразных демпферов, поглощая основные нагрузки и, таким образом, увеличивают срок их эксплуатации.

Затвердевание армированного штампа происходит за счет теплоотвода через поддон, боковые стенки кристаллизатора и за счет разогрева вставки. Область между поддоном и нижней частью вставки является областью затрудненного питания, так как образовавшиеся "мосты" затвердевшего металла могут привести к образованию внутренних усадочных раковин и значительной пористости.

Для определения условий, обеспечивающих качественное соединение жидкого металла и вставки был проведен обширный вычислительный эксперимент, позволивший построить номограмму, связывающую начальную температуру вставки ($T_{в}, ^\circ\text{C}$) с толщиной замороженного слоя ($\delta, \text{см}$) в ее нижней части. временем достижения этой поверхностью заданной температуры ($t, \text{мин.}$) и градиентом температуры (рис.6). Так, для рассматриваемой геометрии (вставка 38% от

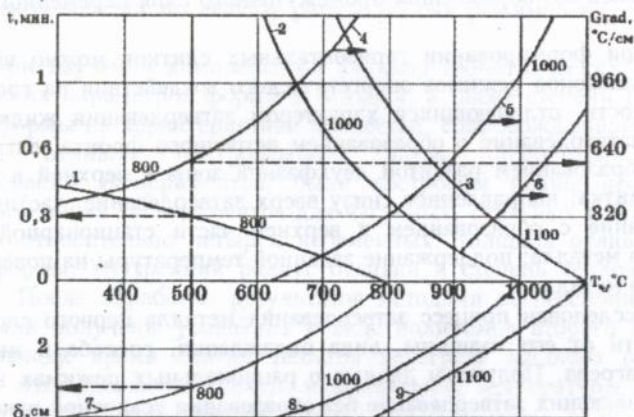


Рисунок 6 - Номограмма, связывающая время достижения нижней поверхностью вставки заданной температуры (1,2,3) величин градиента температур (4,5,6) и толщины замороженного слоя (7,8,9) с начальной температурой вставки.

всей массы), увеличение начальной температуры вставки повышает температуру контактной поверхности и снижает толщину твердой корки. При заливке жидкого металла на вставку с начальной температурой 500 °C ее поверхность прогревается до температуры 800°C через 20 секунд и толщина замороженного слоя при этом составляет 3,4 см. Из номограммы видно, что при начальной температуре вставки ниже 600 °C ее поверхность не прогревается до температуры 1000°C (температуры свариваемости). Для качественного соединения между арматурой и жидким металлом температура предварительного подогрева вставки рассмотренной геометрии должна быть не менее 700 - 800 °C.

Были получены уравнения, позволяющие оценить время достижения поверхностью вставки заданной температуры (800 либо 1000°C) и толщину затвердевшей корки на границе раздела по начальной температуре вставки.

Помимо штампов со вставками прямоугольного сечения были промоделированы варианты затвердевания штампов с центральными вставками в виде треугольников с вершинами вверх и вниз и в виде круга, а также расщепленными вставками. В работе показано, что наиболее благоприятна круглая вставка, а при использовании расщепленных вставок для обеспечения питания нижней части штампа

жидким металлом необходимо, чтобы расстояние между элементами-вставками составляли 2-2.5 их толщины.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На базе системы уравнений в частных производных механики сплошной среды сформулированы сопряженные математические модели процессов затвердевания слитков и отливок, которые могут быть использованы для моделирования широкого класса металлургических и литейных технологий.

2. Изучены теплофизические особенности процессов теплообмена с боковой поверхности затвердевающих слитков и отливок. Используемые математические модели позволили промоделировать условия образования и динамику формирования газового зазора на границе "слиток-форма". Установлено влияние внешнего давления, приложенного к кристаллизующемуся металлу, на динамику образования зазора. Для заданной толщины отливки существует величина критического давления, выше которого затвердевание металла происходит в условиях плотного контакта затвердевшей корки со стенкой изложницы.

3. Обобщая данные вычислительного эксперимента для нескольких марок стали получены аналитические зависимости, связывающие время затвердевания отливки и величину критического давления с размерами отливки.

4. Исходя из теорий контактного теплообмена и теплофизики затвердевания жидкого металла изучена возможность эффективного управления затвердеванием слитков и отливок за счет внешнего теплоотвода. Установлено, что для заданной геометрии изменение внешнего теплоотвода влияет на скорость затвердевания у теплоотводящей поверхности до определенной толщины твердой корки, после чего изменение интенсивности теплоотвода будет оказывать локальное действие на тепловое состояние пристеночной области.

5. Установлено, что теплофизика формирования слитков в изложнице определяется скоростью заливки жидкого металла, условиями теплоотвода, а также теплофизическими и геометрическими характеристиками прибыли. Изучена тепловая работа прибыли при формировании крупных кузнечных слитков, получены рекомендации по выбору ее рациональных характеристик.

Показана эффективность использования принудительного перемешивания жидкого металла для интенсификации теплообменных процессов при затвердевании крупных слитков.

6. Исследованы теплофизические особенности формирования крупных отливок, получаемых методами специальной электрометаллургии (ЭШП, ПЭШО). Получены новые данные о влиянии технологических и теплофизических факторов на тепловое состояние и процессы формирования слитков, оценены рациональные режимы выплавки и предложены оптимальные термовременные характеристики технологических параметров.

Установлена зависимость глубины жидкой металлической ванны от отношения широкой и узкой граней слитка. Показано, что применение вторичного охлаждения слитков ЭШП толщиной 15-20 см с целью управления процессом кристаллизации эффективно, а для слитков с большими размерами узкой грани вторичное охлаждение оказывает лишь локальное влияние на температурное поле вблизи боковых граней.

7. Изучена эффективность управления затвердеванием непрерывного слитка за счет внешнего и внутреннего теплообмена.

Показано влияние процентного соотношения макроохладильников на время затвердевания и глубину жидкой металлической ванны непрерывного слитка.

8. Промоделирован процесс формирования длинномерных центробежнолитых заготовок и изучены теплофизические особенности их формирования. Установлено влияние геометрических и технологических факторов на термовременные характеристики формирования отливок из стали 35 и Х18Н9В, а также оловянной и алюминиевой бронз.

Предложены технологические приемы управления затвердеванием металла во вращающейся форме за счет изменения толщины теплоизоляционного слоя и утепления свободной поверхности отливки флюсом.

9. Вскрыты закономерности развития встречного фронта кристаллизации при затвердевании крупногабаритных стальных и бронзовых заготовок ЦБЛ. Установлено, что для устранения встречного фронта кристаллизации металла толщина флюса на внутренней поверхности кристаллизующейся заготовки должна составлять 4 - 6% толщины слоя металла.

10. Изучены теплофизические особенности формирования двухслойных длинномерных валков на установках центробежного литья. Предложены рациональные параметры утепления формы и времени выдержки порций, обеспечивающих высокое качество литых гетерогенных изделий.

11. Для центробежных установок со сменными вставками предложены оптимальные параметры утепления вставок различной толщины и даны рекомендации по выбору температур нагрева жидкого металла и продолжительности выдержки порций при получении однородных и гетерогенных центробежнолитых отливок.

12. Изучено комплексное влияние геометрических и теплофизических параметров формы и отливки, а также степени теплоизоляции формы на характеристики процессов, сопровождающих затвердевание отливки центробежного литья. Для чугунных, стальных и бронзовых отливок построены регрессионные модели, связывающие толщину отливки, толщину формы, внутренний радиус отливки и степень теплоизоляции формы с термовременными характеристиками (время снятия теплоты перегрева, время полного затвердевания отливки, максимальной температуры внутренней и наружной поверхностей формы, максимальных радиальных и тангенциальных термонапряжений, возникающих в форме). Полученные уравнения могут быть использованы для создания САПР и системы автоматизации технологии центробежного литья отливок из чугуна, стали и бронзы.

13. Изучены особенности кинетики затвердевания плоских слитков. Установлено влияние теплофизических и технологических факторов на тепловое состояние и процессы их формирования. Анализ параметров затвердевания позволяет прогнозировать структурные зоны плоского слитка.

14. При формировании горизонтальных слитков, для различных источников нагрева, установлено существование пяти характерных диапазонов нагрева, отличающихся условиями затвердевания жидкого металла.

Изучены характеристики третьего, наиболее рационального диапазона мощности применительно к электрошлаковому, электроннолучевому и лазерному источникам нагрева.

15. Методом математического моделирования для различных источников нагрева изучены и экспериментально подтверждены тепловые режимы нагрева твердой заготовки до предплавильных температур. Получены зависимости, позволяющая определить длительность нагрева твердой заготовки до оплавления. Предложен метод расчета основных технологических параметров: интенсивность нагрева, ширины и скорости перемещения зоны при электроннолучевом нагреве твердой заготовки перемещающейся зоной нагрева.

16. Проанализировано тепловое взаимодействие первого и второго слоя при формировании биметаллического соединения. Показано, что при формировании биметалла путем заливки жидкого металла

на затвердевший первый слой, для избежания смешивания слоев и устранения зоны переменного состава, заливку второго слоя необходимо производить при температурах поверхности первого слоя ниже его температуры плавления. Для слоев с близкими температурами плавления, температура поверхности должна быть на 60 - 80 °C ниже температуры солидуса. При заливке металла второго слоя с температурой плавления значительно ниже температуры плавления первого слоя между полным затвердеванием жидкого металла первого слоя и заливкой второго слоя необходима пауза - с тем, чтобы снизить температуру поверхности на 10 - 30 °C ниже температуры плавления второго слоя и ограничить время диффузионного взаимодействия жидкой и твердой фаз. Показано, что формирование биметалла по схеме "жидкое на твердое" обеспечивает широкие возможности для управления процессом образования разнородного соединения. Наиболее перспективным направлением в этом классе методов получения биметаллов является нанесение слоя вслед за перемещающейся зоной нагрева.

17. Показано, что при ЭЛП горизонтального слитка в широком диапазоне изменения скорости наплавления и интенсивности электроннолучевой обработки скорость кристаллизации сохраняется постоянной по высоте слитка, а тепловой режим формирования слитка - существенно нестационарным. Установлено, что глубина металлической ванны линейно зависит от скорости наплавления слитка. Линейный характер изменения глубины металлической ванны имеет место лишь в диапазоне сравнительно невысокой интенсивности электроннолучевого нагрева.

Предложены дифференцированные режимы изменения скорости наплавления и интенсивности ЭЛП, обеспечивающие глубину металлической ванны, не превосходящую данную по всей высоте слитка.

18. Изучены особенности формирования литых штампов с внутренними вставками: - установлено влияние начальной температуры вставки и матричного металла на параметры формирования гетерогенной отливки; - получены аналитические характеристики, связывающие параметры затвердевания (время достижения заданной температуры, толщину замороженного слоя) с начальной температурой вставки для различных пар материалов; - исследовано влияние геометрии вставки и ее расположения (центральная, треугольная, круглая, расщепленная) на качество затвердевшего металла. При использовании 5 вставок для обеспечения питания нижней части штампа

жидким металлом необходимо, чтобы расстояние между вставками составляли 2 - 2.5 их толщины.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Демченко В.Ф., Тарасевич Н.И., Хорунжий Ю.Г., Королева Т.В., Бурштейн Н.М. Математическое обеспечение для исследования тепловых процессов при кристаллизации слитков получаемых методами специальной электрометаллургии // Математические методы исследования процессов спецэлектрометаллургии. - Киев: Знание. - 1974. - С.12-25

2. Макара А.М., Стеренбоген Ю.А., Демченко В.Ф., Тарасевич Н.И., Мосендз Н.А., Носатов В.А., Королева Т.В. Кинетика затвердевания бесприбыльного слитка-сляба // Математические методы в исследовании процессов специальной электрометаллургии. - Киев: Наукова думка. - 1976. - С.80-92

3. Zayac J., Demcenko V.F., Tarasevic N.I. Urcenie rozlozenia jouleovych zdrojov tepla pri elektroskovom navaraní valcon stolic // Zvaranie 9-10, 1976, Rocnik, XXV, s.262-266.

4. Латаш Ю.В., Воронин А.Е., Демченко В.Ф., Тарасевич Н.И., Матях В.Н. К вопросу расчета температурных полей плоских металлических заготовок, нагреваемых в шлаковой ванне // Специальная электрометаллургия. - Киев-Москва. - 1978. - вып.35. - С.41-50.

5. Демченко В.Ф., Тарасевич Н.И., Зельниченко А.Т. Численное исследование динамики движения двух плоскостей в центробежных установках // Вычислительная техника в современном научно-техническом прогрессе. - Киев: КГУ. - 1978. - С.33-37.

6. Демченко В.Ф., Тарасевич Н.И., Мисюра Р.С. Исследование контактного теплообмена при формировании листового слитка ЭЛП // Проблемы специальной электрометаллургии. - Киев: Наукова думка, 1978. - Вып.8. - С.71-78.

7. Патон Б.Е., Медовар Б.И., Богаченко А.Г., Демченко В.Ф., Тарасевич Н.И., Штанько Ю.П. Исследование температурных полей при затвердевании крупных слитков-слябов ЭСП // Проблемы специальной электрометаллургии. - Киев: Наукова думка, 1978. - Вып.8. - С.3-10.

8. Медовар Б.И., Богаченко А.Г., Демченко В.Ф., Тарасевич Н.И., Штанько Ю.П. Температурное поле крупных слябовых слитков ЭСП // Электрошлаковый переплав. - Киев: Наукова думка, 1979. - С. 127-137.

9. Тарасевич Н.И., Зельниченко А.Т. Численный метод решения задач теплопроводности с неидеальным тепловым контактом

//Теплофизика технологических процессов.- Волгоград, 1980.- С.113-115.

10. Ефимов В.А., Тарасевич Н.И., Демченко В.Ф., Затуловский С.С. Исследование влияния технологических параметров и дисперсных инокуляторов на затвердевание непрерывной сортовой заготовки методом математического моделирования // Теплофизика стального слитка.-Киев: ИПЛ, 1980. -С.3-9.

11. Воронин А.Е., Демченко В.Ф.,Латаш Ю.В.,Тарасевич Н.И. и др. Особенности затвердевания слитков при электрошлаковой разливке стали//Теплофизика стального слитка.- Киев: ИПЛ, 1980. - С.25-29.

12. Демченко В.Ф., Тарасевич Н.И., Мосендз Н.А. и др. Тепловые процессы при электрошлаковом обогреве твердой заготовки // Специальная электрометаллургия.- Киев-Москва, 1981.-Вып.46.- С.25-31.

13. Затуловский С.С., Тарасевич Н.И., Демченко В.Ф., Юдович А.А. Исследование влияния технологических параметров и дисперсных инокуляторов на затвердевание непрерывной сортовой отливки методом математического моделирования// Непрерывное литье. - М.:Металлургия.-1981.-N7.-С.9-17.

14. Тихоновский А.Л., Демченко В.Ф., Тарасевич Н.И., Тригуб Н.П. Численное моделирование формирования горизонтального листового слитка электроннолучевого переплава //Проблемы специальной электрометаллургии.- Киев: Наукова думка, 1982.- Вып.49. С.59-65.

15. Демченко В.Ф., Тарасевич Н.И., Мисюра Р.С., Тихоновский А.Л. Электроннолучевой нагрев листовой заготовки // Проблемы специальной электрометаллургии.- Киев: Наукова думка, 1982, Вып.11.- С.47-51.

16. Тарасевич Н.И., Зельниченко А.Т., Демченко В.Ф., Шевченко А.И., Шелковникова Л.П. Моделирование гидродинамических и тепловых процессов при отливке центробежного литья// Математическое моделирование процессов затвердевания металлов и сплавов.- Новосибирск: ВЦ Сиб.отд.АН СССР,1983.- С.126-128.

17. Тарасевич Н.И., Литвин И.А., Корниец И.В., Якобше Р.Я. Исследование влияния толщины стенки изложницы при отливке листовых слитков массой 3,6т на ее тепловое состояние // Разливка кипящей стали.-Киев : ИПЛ,1984.-С.37-43.

18. Махненко В.И., Демченко В.Ф., Крикент И.В., Тарасевич Н.И. Расчетная система для исследования токораспределения в шла-

ковой ванне // Проблемы специальной металлургии. - К.: Наукова думка, 1985. - Вып. 1. - С. 14-19.

19. Тарасевич Н.И., Затуловский С.С., Быков В.Н., Затуловский А.С. Выбор и исследование параметров управления процессом формирования штамповых заготовок в установках с ЭШО // Оптимизация процессов промышленной кристаллизации и разработка систем автоматизированного проектирования технологии литья. - Устинов, 1986.

20. Тарасевич Н.И., Корниец И.В., Кутузов В.П., Жигунов Ю.В. Исследование термонапряженного состояния формы в процессе затвердевания цилиндрических отливок при центробежном литье / Оптимизация процессов промышленной кристаллизации и разработка систем автоматизированного проектирования технологии литья. - Устинов, 1986. - С. 21-26.

21. Тарасевич Н.И., Корниец И.В. Затвердевание непрерывного слитка при различных режимах вторичного охлаждения / Совершенствование технологии получения литых материалов. - Киев: ИПЛ, 1986. - С. 64-69.

22. Тарасевич Н.И., Затуловский С.С., Затуловский А.С., Быков В.Н. и др. Особенности кинетики формирования структуры и свойств литых армированных заготовок, штампов / Новые высокопроизводительные технологические процессы, высококачественные сплавы и оборудование в литейном производстве. - Киев: ИПЛ, 1986. - С. 29-32.

23. Шевченко А.И., Тарасевич Н.И., Кутузов В.П., Шелковникова Л.П., Корниец И.В. Математическая модель центробежного литья крупных длинномерных отливок // Математическое моделирование технологических процессов обработки металлов. - Пермь: ППИ, 1987. - С. 104-106.

24. Тарасевич Н.И., Корниец И.В., Токарева О.О. Применение методов математического и статистического моделирования для исследования процессов формирования отливок центробежного литья // Численные методы механики сплошной среды. - Красноярск: ВЦ Сиб.отд. АН СССР, 1987. - Ч. 2. - С. 107-112.

25. Ефимов В.А., Демченко В.Ф., Тарасевич Н.И., Шелковникова Л.П., Зельниченко А.Т. Математическая модель процесса формирования крупногабаритных центробежнолитых заготовок / Повышение качества и снижение металлоемкости центробежного литья. - Киев: ИПЛ, 1988. - С. 25-34.

26. Тарасевич Н.И., Затуловский А.С., Корниец И.В. Применение математического моделирования для исследования восстановле-

ния штампов в установках с электрошлаковым обогревом / Научно-технический прогресс в производстве ферросплавов и электростали. - Челябинск: НИИМ, 1988. - С.77-79.

27. Тарасевич Н.И., Шевченко А.И., Корниец И.В., Кутзов В.П., Шелковникова Л.П. Математическая модель центробежного литья крупных длинномерных отливок // Краевые задачи. - Пермь: ППИ, 1988.

28. Тарасевич Н.И., Затуловский А.С., Лейн А.А., Корниец И.В. Эффективность армирования крупных литых штампов ЭШО/Пути повышения качества и экономичности литейных процессов. - Одесса: ОПИ, 1988. - С.86-90.

29. Тарасевич Н.И., Затуловский А.С., Колечко А.А., Лейн А.А. Выбор и исследование параметров управления процессом формирования штамповых заготовок в установках с ЭШО/Суспензионное и композиционное литье. - Киев: ИПЛ, 1988. - С.60-64

30. Тарасевич Н.И., Корниец И.В., Пряжников Л.Г., Бабич В.Н. Оценка методами математического моделирования роли вторичного охлаждения при формировании непрерывного горизонтального слитка/Интенсификация литейных технологий. - Киев: ИПЛ, 1989. - С.72-77

31. Тарасевич Н.И., Корниец И.В. Исследование некоторых особенностей формирования гетерогенных центробежнолитых валков / Прогрессивные способы управления процессом формирования отливки. - Киев: ИПЛ, 1989. - С.7-12.

32. Тарасевич Н.И., Корниец И.В. Численное моделирование затвердевания ограниченного объема жидкого металла с массивным внутренним холодильником при учете внешнего воздействия на свободной поверхности/Численные методы механики сплошной среды, - КГУ: Красноярск, 1989. - С.24-28.

33. Тарасевич Н.И., Корниец И.В. Моделирование затвердевания непрерывного горизонтального слитка / Обобщение опыта работы молодых ученых инженеров и рабочих по экономии материальных и энергетических ресурсов. - Донецк: Черметинформация, 1989. - С.53-55.

34. Тарасевич Н.И., Корниец И.В., Шелковникова Л.П. Математическая модель литья крупногабаритных заготовок/Третья международная конференция по применению компьютеров в литейном производстве. - София. - 1990.

34. Тарасевич Н.И., Корниец И.В., Мартынюк В.В., Липинская Е.А. Влияние интенсивности теплоотвода со свободной поверхности на затвердевание горизонтального бесприбыльного слитка

ка/Процессы разливки, модифицирования и кристаллизации стали и сплавов.- Волгоград.-1990. -С.111-114.

36. Тарасевич Н.И., Корниец И.В. Математическое моделирование процессов формирования литых композитов армированных гранулами/Проблемы кристаллизации сплавов и компьютерное моделирование. -Ижевск:УдГУ, 1990. - С.35-37.

37. Тарасевич Н.И., Гончар Б.И., Таранов Е.Д., Шульга В.Т. Принципы и методы оптимизации скорости литья крупных отливок из железоуглеродистых сплавов//Процессы литья.-Киев: Наукова думка, 1990. - Вып. 1.- С.16-22.

38. Тарасевич Н.И., Корниец И.В., Шелковникова Л.П., Бервинов В.П. Формирование первого слоя двухслойной центробежнолитой отливки/Центробежное литье - прогрессивный технологический процесс производства труб и заготовок ответственного назначения.- Киев: ИПЛ, 1990. -С.33-37.

39. Тарасевич Н.И., Корниец И.В., Медовар Л.Б. Влияние интенсивности теплоотвода на скорости затвердевания горизонтальных бесприбыльных слитков//Физико-химические основы металлургических процессов.-Москва: ИМЕТ, 1991. -С.55-58.

40. Тарасевич Н.И., Корниец И.В., Шелковникова Л.П. Выбор управляющих параметров центробежного литья крупногабаритных заготовок/Моделирование, управление и прогнозирование в технических системах. - Владивосток, 1991. -С.24-26.

41. Тарасевич Н.И., Корниец И.В., Костенко Г.Д., Стоянова Е.Н. Исследование тепловых особенностей формирования биметаллических пар методами математического моделирования/Теория и практика процессов получения биметаллических и композиционных отливок.- Киев: Знание, 1991. -С.15-17.

42. Осипов В.П., Тарасевич Н.И., Узиенко Б.А., Корниец И.В. Исследование процесса формирования крупных листовых слитков ответственного назначения методами вычислительного эксперимента /Процессы разливки и кристаллизации стали.-Киев: ИПЛ, 1991.- С.82-85.

43. Абрамов В.В., Ефимов В.А., Швеиц П.П., Тарасевич Н.И., Будник А.А. Метод приближенной оценки напряженного состояния слитка//Процессы литья.- Киев: Наукова думка, 1991.- Вып.3.- 1991.-С.1-6.

44. Демченко В.Ф., Тарасевич Н.И., Мартынюк В.В. Вычислительная система на базе ПЭВМ моделирования процессов затвердевания в произвольной области с ограниченным числом вклю-

чений/Кристаллизация и компьютерные модели. - Ижевск: УдГУ, 1991. - С.62-68.

45. Тарасевич Н.И., Корниец И.В., Шелковникова Л.П. Моделирование процессов формирования крупных плоских слитков // Известия ВУЗов.Черная металлургия,1991.-N 12. - С.56-57.

46. Тарасевич Н.И., Мартынюк В.В., Лишинская Е.А. Компьютерная информационно-поисковая система по свойствам материалов//Известия ВУЗов.Черная металлургия,1991.-N12.-С.64-65.

47. Тарасевич Н.И., Корниец И.В., Гаврилюк В.С. Влияние дифференцированного теплоотвода на структуру и свойства биметаллических отливок /Новые литейные материалы и технология их получения.-Киев:ИПЛ,1991. -С.42-49.

48. Тарасевич Н.И., Корниец И.В.,Осипов В.П.,ДубровинЭ.Ю. Некоторые теплофизические особенности затвердевания листовых слитков //Процессы литья.- Киев: ИПЛ,1992.- N1.-С.38-44.

49. Тарасевич Н.И.,МедоварЛ.Б.,Корниец И.В.,ДубровинЭ.Ю. Теплофизические особенности затвердевания плоского слитка из стали 09Г2 //Процессы литья.-Киев: ИПЛ,1992. - N3.-С.21-25

50. Тарасевич Н.И., Корниец И.В., Шелковникова Л.П. Численное моделирование особенностей формирования центробежнолитых крупногабаритных заготовок // Процессы литья.- Киев: ИПЛ. - 1992.- N4.-С.35-43.

51. Тарасевич Н.И., Перелома В.А., Ликер Р.Я. Некоторые теплофизические особенности лазерной обработки железоуглеродистых сплавов//Металлы и литье Украины.-Киев,1994.-N 3.-С.19-25.

52. Тарасевич Н.И., Ефимов В.А., Корниец И.В. К вопросу управления процессом затвердевания слитка путем регулирования интенсивности внешнего теплоотвода//Процессы литья.-Киев : ИПЛ, - 1994. - N4. - С.3-10.

53. Тарасевич Н.И., Перелома В.А., Ликер Р.Я. Определение оптимального режима обработки поверхности изделий из высокопрочного чугуна высокотемпературными источниками нагрева/Нетрадиционные методы снижения металлоемкости и повышения качества отливок.-Киев: ИПЛ,1993. - С.81-84

54. Тарасевич Н.И., Корниец И.В. Исследование параметров затвердевания отливок в условиях наложения внешнего давления/Компьютерное материаловедение и информатизация создания новых веществ и материалов. - Киев: ИЭС им.Е.О.Патона, 1995.- С.16-18.

55. Тарасевич Н.И., Перелома В.А., Ликер Р.Я. Исследование тепловых процессов при лазерной обработке железоуглеродистых сплавов // Процессы литья.-Киев:ИПЛ НАНУ.- 1995.-N 2.- С.38-48.

56. Тарасевич Н.И., Корниец И.В., Затуловский А.С. Моделирование процесса формирования литых композиционных материалов // Процессы литья.-Киев:ИПЛ НАНУ.-1995.-N4.-С.40-49.

57. Тарасевич Н.И. К вопросу оценки интенсивности теплообмена между отливкой и формой при наложении внешнего давления // Процессы литья.-Киев: ФТИМС НАНУ, 1997. - N1. - С.65-72.

58. Тарасевич Н.И. Влияние давления на формирование газового зазора при затвердевании стальной отливки // Процессы литья.-Киев: ФТИМС НАНУ, 1997. - N1. - С.23-32.

59. Тарасевич Н.И. Формирование в установках ЭШО штампов армированных расщепленными вставками // Проблемы специальной электрометаллургии.-Киев: ИЭС им.Е.О.Патона НАНУ, 1997. - N1.- С.11-14.

60. Тарасевич Н.И. Лазерная обработка поверхности твердой заготовки // Проблемы специальной электрометаллургии.-Киев: ИЭС им.Е.О.Патона НАНУ, 1997. - N1. - С.70-73.

61. Тарасевич Н.И. К вопросу теплофизики формирования плоских горизонтальных слитков // Металл и литье Украины.- Киев, 1997, N 5.-С.7-9.

62. М.І.Тарасевич Прогнозування структурних зон виливка на базі теплофізичних досліджень // Металознавство та обробка металів, 1996, N 4. - С.58-62.

63. Тарасевич Н.И., Шелковникова Л.П., Корниец И.В. Исследование процессов формирования крупногабаритных центробежнолитых отливок.- Препринт.- Киев: ИПЛ, 1988.-43с.

По теме диссертации получены авторские свидетельства на изобретения за NN 596002; 2386582/02; 606356; 2669075/37

Личный вклад автора в опубликованных работах состоит в следующем : [1,6,10,16,23,24,26,34,35,45] - разработка математических моделей, вычислительных алгоритмов теплофизических процессов, сопровождающих получение слитков и отливок по различным технологическим схемам; [9,14,18,25,27,46,48] - разработка программного обеспечения для реализации сформулированных моделей; остальные работы связаны с проведением вычислительного эксперимента, обработкой результатов и получением рекомендаций по оптимизации соответствующих технологических процессов

АННОТАЦИЯ

ТАРАСЕВИЧ Н.И. Формирование слитков и отливок при регулируемом теплофизическом воздействии.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.02. "Металлургия черных металлов". Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев, 1997 г.

Защищаются сопряженные математические модели и численные исследования процессов затвердевания слитков и отливок, получаемых по различным технологическим схемам.

Впервые проведен анализ условий теплообмена с боковой поверхности затвердевающего слитка (отливки) с учетом образования и динамики формирования газового зазора на границе "слиток-форма". Установлено влияние внешнего давления, приложенного к жидкому и кристаллизующемуся металлу, на формирование газового зазора. Для некоторых материалов определены критические значения давления, выше которых затвердевание происходит в условиях плотного контакта. Получены аналитические зависимости, позволяющие оценить время затвердевания отливки и критическое давление по ее толщине.

Проведен анализ эффективности управления процессом затвердевания за счет внешнего теплоотвода.

Изучены теплофизические особенности формирования слитков и отливок, получаемых в изложницах, машинах непрерывного литья, в центробежных установках, методами специальной электрометаллургии и др.

Обширный вычислительный эксперимент позволил получить для ряда технологий описание термовременных характеристик формирования отливок через геометрические и технологические параметры, которые могут быть использованы в системах автоматического управления, САПР и экспертных системах.

Основные положения диссертации опубликованы в 75 статьях и защищены 4 авторскими свидетельствами.

Ключевые слова : слиток, отливка, теплофизика, кристаллизация, теплоперенос, математическое моделирование, вычислительный эксперимент, внешние воздействия.

АНОТАЦІЯ

ТАРАСЕВИЧ М.І. Формування зливків та виливків при регульованій теплофізичній дії.

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.02. "Металургія чорних металів". Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ, 1997.

Захищаються спряжені математичні моделі та чисельні дослідження процесів тверднення зливків та виливків, які можуть бути одержані за різноманітними технологічними схемами.

Вперше проведено аналіз умов теплообміну з бічної поверхні твердіючого зливку (виливки) з урахуванням утворення та динаміки формування газового зазору на межі "зливко-форма".

Встановлено вплив зовнішнього тиску на формування газового зазору. Для деяких матеріалів визначено критичні значення тиску, вище яких тверднення здійснюється за умов щільного контакту. Одержано аналітичні залежності, які дозволяють оцінити тривалість тверднення зливків та критичний тиск по їх товщині.

Проведено аналіз ефективності управління процесом тверднення завдяки зміні зовнішнього теплообміну.

Вивчено теплофізичні особливості формування зливків та виливків, які одержують в виливницях, в машинах безперервного лиття, в машинах відцентрового лиття, методами спеціальної електроталургії та ін.

Значний обчислювальний експеримент дозволив одержати для деяких технологій опис термочасових характеристик формування зливків через геометричні та технологічні параметри, які можуть бути використані в системах автоматичного управління, САПР та експертних системах.

Основні положення дисертації викладені у 75 статтях та захищені 4 авторськими свідоцтвами.

Ключові слова: зливко, виливо, теплофізика, кристалізація, математичне моделювання, обчислювальний експеримент, зовнішня дія.

SUMMARY

N.I.Tarasevich. The formation of ingots and castings under regulated heat-physical action.

The dissertation for doctorate in technical sciences on speciality 05.16.02. "Iron and Steel Metallurgy". Physico-Technological Institute of Metals and Alloys NAS Ukraine, Kiev, 1997.

The conjugate mathematical models and numerical studies of the processes of hardening of ingots and castings, produced on different flowcharts, are defended.

The author has carried out the analysis of conditions of heat exchange with lateral surface of ingot (casting) to be hardened with account of generation and the dynamics of formation of gaseous gap at the ingot-mould interface. The action, applied to molten and crystallizing metal, of external pressure on the formation of gaseous gap has been established. For some materials, the critical values of pressure, above which the hardening proceeds under conditions of close contact, have been determined. The analytical dependences, allowing to estimate the time for casting hardening and critical pressure along its thickness, have been received.

The author has made an analysis of effectiveness of hardening process regulation for account of external heat removal.

Also the heat-physical peculiarities of formation of ingots and castings, produced in ingot moulds, machines of continuous casting, centrifugal units, by methods of special electric metallurgy, etc., have been studied.

The broad calculation experiment has allowed to obtain for a number of technologies the description of heat-time characteristics of formation of castings via geometrical and technological parameters, which can be used in the systems of automatic control, automatic modelling, and expert systems.

The basic issues of the dissertation are published in 75 articles and covered by 4 copyright certificates.

Key words: ingot, casting, heat-physics, crystallization, heat transfer, mathematical modelling, calculation experiment, external actions.

Підп. до друку 06.06.97 Формат 60×84¹/₁₆.
Папір друк. № 1 . Спосіб друку офсетний. Умовн. друк. арк. 2.0.
Умовн. фарбо-відб. 2.0. Обл.-вид. арк. 2.0.
Тираж 100 . Зам. № 7-1673.

Фірма «ВІПОЛ»
252151, Київ, вул. Волинська, 60.

432783

AB 38.083