

1554056

На правах рукописи

Моисеев Виктор Сергеевич

**Разработка методов проектирования
литниково-питающих систем и средств управления
затвердеванием отливок на основе решения
комплекса технологических задач**

Специальность 05.16.04 - Литейное производство

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

Москва - 1997 г.



55.15.03

621 79.01

Работа выполнена в
Московском государственном авиационном технологическом
университете им. К. Э. Циолковского (МАТИ)

Научный консультант:
Доктор технических наук, профессор

Неуструев А. А.

Официальные оппоненты:
Заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор

Баландин Г. Ф.

Доктор технических наук, профессор

Матвеев И. В.

Доктор технических наук

Кац Э. Л.

Ведущее предприятие:
АО "Балашихинский литейно-механический завод"

Защита состоится "___" _____ 1997 г. в _____ часов
на заседании диссертационного сс
Государственном Техническом Ун-те
адресу: 107005, Москва, 2-я Б-ка

С диссертацией можно ознакомиться
в библиотеке Государственного технического университета

Ваш отзыв на автореферат
печатью, просим направлять по адресу:
Телефон для справок 267-11-11

Автореферат разослан "___" _____ 1997 г.

Ученый секретарь Совета
Д053.15.05,
к. т. н., доцент

Подписано к печати
Заказ N _____

1554 56

Общая характеристика работы

Актуальность. Одной из главных современных проблем отечественного литейного производства является повышение конкурентноспособности литых деталей за счет улучшения их качества, снижения металлоемкости, сокращения сроков и затрат на технологическую подготовку производства отливок. В значительной мере решение этой проблемы зависит от достоверности и эффективности методов проектирования технологических процессов литья и возможности создания соответствующих систем автоматизированного проектирования.

За последнее время в области автоматизации проектирования технологических процессов литья достигнуты определенные успехи. Наибольшего развития получили САПР ТП, основой которых служит моделирование литейных процессов. Тем не менее, даже при использовании вычислительной техники в процессе проектирования возникают определенные трудности при выполнении расчетов технологических средств воздействия на процесс формирования отливки с целью предотвращения образования в них дефектов. Доводка технологического процесса, как правило, осуществляется в интерактивном режиме на основе рекомендаций проектировщика с повторным компьютерным моделированием до получения положительного результата, что затрудняет принятие оптимальных проектных решений.

Системы моделирования литейных процессов не содержат также решения ряда эвристических задач начального этапа проектирования, таких как, выбор положения отливки в форме, поверхности ее разъема и типа литниковой системы. В большинстве случаев при моделировании процесса затвердевания отливки в форме эти исходные параметры задаются технологом на основе опыта и интуиции. Алгоритмизация решения названных задач способствует обобщению производственного опыта и выработке типовых проектных решений, что позволяет унифицировать технологические решения и процессы. Важное значение для оптимизации технологических процессов литья имеет совершенствование методов непосредственного расчета исполняемых размеров литниково-питающих систем, конструкции которых оказывают решающее влияние на качество отливок, а также технологических средств воздействия на направленность затвердевания отливок с целью повышения их плотности.

Актуальность работы подтверждается также выполнением ее в со-



ответствии: с комплексной программой "Авиационная технология" Миновиапрома и Минвуза РСФСР на 1986-1990 г.г.; с координационным планом Департамента авиационной промышленности на 1991-1995 г.г.; с грантом в рамках комплексной программы "Фундаментальные проблемы авиакосмической техники" ГК РФ по высшему образованию на 1994-1995 г.г.

Цель работы: повышение эффективности технологической подготовки производства литых заготовок путем использования в системах автоматизированного проектирования технологических процессов литья разработанных методов проектирования литниково-питающих систем и технологических средств управления направленностью затвердевания отливок на основе решения комплекса технологических задач.

Методы исследования. Поставленная цель достигнута путем: разработки на основе теории теплопроводности, тепловой теории литья и литейной гидравлики математических моделей литейных процессов и решения их аналитическими методами; использования системного анализа и кибернетических методов для решения эвристических задач начального этапа проектирования; экспериментального гидромоделирования при различных условиях заливки форм и термометрирования затвердевания отливок в разных видах литейных форм для проверки адекватности расчетных методик.

Научную новизну составляют следующие результаты:

1. Создана трехуровневая комплексная система начального этапа автоматизированного проектирования технологических процессов литья (ТПЛ), которая выполняет в зависимости от объема исходной информации процедуры поиска аналогичных апробированных типовых ТПЛ, синтез исходного варианта технологической разработки и выбор проектных решений.

2. На основе уравнения Бернулли решены задача о распределении расхода расплава по питателям многопитательных литниковых систем и обратная задача определения размеров сечений питателей по заданному распределению расхода при гравитационной заливке расплава в форму.

3. На основании уравнений Бернулли и Навье-Стокса решена задача о течении расплава в каналах литниковой системы и рабочей полости формы при центробежной заливке форм с вертикальной осью вращения. Результаты решения задачи использованы для определения профиля и конструктивных особенностей каналов литниковой системы.

обеспечивающих их полное заполнение расплавом, повышение его расхода и снижение пульсаций в потоке.

4. Развитие аналитического метода поузлового расчета затвердевания отливок в отношении его инвариантности к геометрии отливок, их сплавам и видам литейных форм. Инвариантность к геометрии отливки реализуется общим уравнением теплового баланса затвердевания ее узлов, элементов и участков, составленным по принципу суперпозиций, решением методами теплопроводности задач определения стоков теплоты из массивных частей узлов в сопряженные с ним тонкие элементы и перетоков теплоты между соседними массивами. Теплофизические свойства сплавов, влияние морфологии их затвердевания и взаимного наложения стадий формирования отливки определены эквивалентными свойствами и соответствующими эквивалентными начальными температурами расплава, заполнившего форму. Для расчета теплообмена в формах разного вида, аккумулирующая способность которых меньше аккумулирующей способности отливки (кокиль, оболочковые формы), определены эффективные коэффициенты аккумуляции теплоты форм, учитывающие как их аккумулирующую способность, так и условия теплообмена на их поверхностях. Кроме этого, учтено влияние на теплообмен внешних углов формы и галтелей отливки, определены стоки теплоты в стержни, оформляющие внутренние полости и участки наружной поверхности отливки. Учтено влияние термического сопротивления массива узла на время его затвердевания. Все перечисленные задачи решены методами теории теплопроводности.

5. Установлена возможность применения метода поузлового расчета затвердевания отливок для решения обратных задач выполнения расчетов размеров прибылей и дистанций их действия, размеров технологических напусков и различных технологических средств воздействия на интенсивность охлаждения участков отливки для обеспечения требуемой направленности ее затвердевания. При расчетной оценке направленности затвердевания отливок использованы критерии непрерывности питания в виде относительного временного градиента или отношения температурного градиента к линейной скорости затвердевания в зоне фильтрационного питания в зависимости от морфологии затвердевания отливки.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

- основой начального этапа автоматизированного проектирования технологических процессов литья служит разработанная треху-

ровневая комплексная система, включающая поиск аналогичных апробированных типовых или единичных ТПЛ, синтез исходного варианта технологической разработки, оценку и выбор проектных решений;

- в расчетах продолжительности затвердевания отливок в формах ограниченной толщины (кокилях, керамических формах) возможна их замена эквивалентными в тепловом отношении полуграниченными формами с эффективными коэффициентами аккумуляции теплоты, методика расчета которых разработана на основе теории теплопроводности; такая замена позволила получить инвариантный по отношению к виду формы метод расчета продолжительности затвердевания;

- метод расчета направленности затвердевания фасонной отливки основан на решении уравнения теплового баланса, составленного для узлов (элементов) отливки с использованием принципа суперпозиции и включающего выделение теплоты при затвердевании и охлаждении массива узла, отвод теплоты в форму, ее внешние углы и галтели, в стержень, оформляющий внутреннюю полость в массиве или часть его наружной поверхности, стоки теплоты теплопроводностью в сопряженные с массивом тонкие элементы отливки, перетоки теплоты из ее соседних узлов; этот метод расчета инвариантен по отношению к геометрии за счет выбора соответствующих видов стоков и перетоков теплоты;

- для условий центробежного литья с вертикальной осью вращения расчеты направленности затвердевания отливок (в частности из титановых сплавов) выполняются на основе поузлового метода и решения уравнения материального баланса центрифугирования частиц твердой фазы, кристаллизующихся в объеме фасонной отливки;

- проверка направленности затвердевания и непрерывности питания отливок с целью прогнозирования образования в них усадочных дефектов проводится с помощью разработанной методики расчета относительного временного или температурного градиентов в зависимости от морфологии затвердевания сплава и сравнения их с критическими значениями, а для предупреждения образования усадочных дефектов рассчитывается требуемый эффективный коэффициент аккумуляции теплоты формы и по его величине определяются рациональные технологические средства управления направленностью затвердевания отливки.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в разработке пакета программ автоматизированного проектирования литниково-питающих систем отливок, включающего информационно-поис-

ковые системы ТП литья легких сплавов в песчаные формы и центробежного литья титановых сплавов в формы по выплавляемым моделям, а также решения технологических задач: выбора положения отливки в форме и типа литниковой системы; расчета многопитательных литниковых систем; расчета максимально допустимого расхода и температуры расплава при гравитационной заливке форм; расчета направленности затвердевания и непрерывности питания отливок; расчета размеров прибылей и технологических напусков; расчета технологических средств управления направленностью затвердевания отливок при литье в песчаную форму, кокиль и формы по выплавляемым моделям; проектирования литниковых систем и расчета направленности затвердевания отливок из титановых сплавов при центробежном литье.

Разработанное программное обеспечение расчета ЛПС апробировано и передано в промышленную эксплуатацию на следующие предприятия авиационной промышленности: АО "Балашихинский литейно-механический завод", НПО им. В. В. Чернышова, НИАТ, НИИД, Ульяновский авиационно-промышленный комплекс, Ташкентское авиационно-промышленное объединение им. В. П. Чкалова.

Результаты работы в виде прикладных программ, методик проектирования ЛПС и математических моделей используются в учебном процессе на кафедре "Технология литейного производства" МАТИ им. К. Э. Циолковского, в ряде курсов лекций, а также курсовом и дипломном проектировании.

Диссертация выполнялась в соответствии с планом кафедры "ТЛП" МАТИ по ряду госбюджетных и хоздоговорных НИР в области автоматизации проектирования ТП литья.

Апробация работы. Материалы диссертации доложены на:

- областной НТК "Повышение качества отливок и эффективности методов литья", г. Уфа, 1986 г.;
- семинаре "День новой техники и передового опыта в литейном производстве", ЦП НТО Машпром, секция "Литейное производство", 1987 г.;
- Всесоюзной НТК литейщиков, г. Алма-Ата, 1987 г.;
- семинаре комитета по применению ЭВМ для проектирования литейной технологии, МГП НТО Машпром, 1987 г.;
- зональной НТК "Применение ЭВМ для разработки технологических процессов литья, проектирования оснастки и анализа качества отливок", г. Андропов, 1987 г.;

- XVIII республиканской НТК МУиС, г. Киев, 1987 г.;
- XV НТК литейщиков Западного Урала, г. Пермь, 1989 г.;
- НТК "Технологические вопросы повышения надежности титановых отливок", НИАТ, г. Рыбинск, 1989 г.;
- НТК "Машинная графика и подготовка специалистов по САПР", ВНТО им. С. И. Вавилова, г. Москва, 1989 г.;
- межотраслевой НТК, НИАТ, г. Москва, 1990 г.;
- российских НТК "Новые материалы и технологии", МГАТУ, г. Москва, 1992 г.; 1994 г.; 1995 г.;
- VI международной НТК "Кристаллизация. Компьютерные модели, эксперимент, технологии", г. Ижевск, 1994 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 47 статей, получен один патент, издано учебное пособие для ВУЗов "Автоматизированное проектирование технологических процессов литья", получены бронзовая (1984) и серебряная (1987) медали ВДНХ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 192 наименований, приложений. Работа изложена на 226 страницах машинописного текста, содержит 82 рисунка, 10 таблиц, общий объем - 379 стр.

Основное содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность и сформирована цель работы, изложена научная новизна, практическая значимость и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ методов расчета отливок и опыта разработки систем автоматизированного проектирования технологических процессов литья. Изложены основные опубликованные результаты в области решения технологических задач методами системотехники, математического моделирования процессов формирования отливок, расчета литниково-питающих систем (ЛПС) и заполнения форм расплавом, направленности затвердвания и непрерывности питания отливок.

Большой вклад в развитие теории и практики решения указанных задач внесли Г. Ф. Баландин, А. И. Вейник, Н. Г. Гиршович, В. М. Голод, В. В. Десницкий, Г. М. Дубицкий, В. А. Журавлев, А. А. Неуструев, Ю. А. Нехендзи, Б. В. Рабинович, Г. И. Тимофеев и другие.

Проведенным анализом установлено, что из числа задач, решаемых при разработке технологического процесса литья, наибольшее

развитие получили направления, основанные на расчетах кинетики процессов затвердевания и питания отливок численными методами. Обеспечивая высокую информативность и достоверность, эти методы, тем не менее, отличаются высокой трудоемкостью и большим объемом вычислительных операций, для чего требуются мощные компьютеры (типа WS и SK). Вместе с этим, численные методы не позволяют напрямую рассчитывать оптимальные параметры технологии, обеспечивая лишь последовательную ее доводку в интерактивном режиме.

В последние годы расширяется применение метода поузлового расчета затвердевания отливок. Его отличительной особенностью является существенное снижение трудоемкости при удовлетворительной достоверности результатов вычислений и возможность прямого расчета рациональных технологических средств воздействия на их качественное формирование.

Наряду с задачами моделирования литейных процессов важное место при автоматизированном проектировании ЛПС занимает решение задач, требующих эвристического подхода, комплексное использование которых с математическим моделированием, способствует увеличению надежности проектных решений.

Наиболее эффективным методом расчета литниковых систем разных типов является метод, основанный на решении уравнений Бернулли и теплообмена между потоком расплава и формой. Он позволяет достоверно рассчитывать расходы расплава во всех элементах литниковой системы, в том числе суммарный расход в питателях, определить заполняемость и распределение температуры расплава в форме в конце ее заливки. Однако затруднительны расчеты распределения расхода по питателям многопитательных литниковых систем, и особенно, сечений питателей при заданных распределениях расхода.

Менее изучен центробежный способ заливки с вертикальной осью вращения формы, в частности, при получении фасонных отливок из титановых сплавов. При расчете затвердевания титановых отливок необходимо учитывать особенности действия центробежных сил, создающих центрифугирование частиц твердой фазы в расплаве.

Принимая во внимание изложенное, в работе поставлены следующие основные задачи исследований:

1. На основе системного анализа, теорий информационного поиска, распознавания и принятия решений разработать методики решения эвристических задач начального этапа проектирования ЛПС, включая

выбор положения отливки в форме, поверхности ее разъема и типа литниковой системы, а также методологию информационного поиска технологических процессов литья.

2. Разработать методику расчета многопитательных литниковых систем для гравитационной заливки форм с определением сечений питателей при заданном, в частности равномерном, распределением расхода расплава по питателям.

3. С целью дальнейшего развития метода поузлового расчета решить ряд новых задач определения стоков и перетоков теплоты теплопроводностью в узлах отливок и систематизировать ранее решенные задачи. Учесть влияние термического сопротивления массивных частей узлов отливок на время их затвердевания. Расширить возможности расчетов отвода теплоты в разные виды форм с учетом влияния внешних углов и галтелей отливок, а также в стержни, оформляющие внутренние полости и части поверхности отливок. На базе результатов решения задач разработать метод расчета затвердевания узлов, элементов и участков отливок, инвариантный к геометрии отливок, их сплавам и разным видам форм.

4. На основе метода поузлового расчета затвердевания отливок путем решения обратных задач разработать методики расчета размеров прибылей, дистанций их действия и технологических напусков.

5. С использованием известных критериев непрерывности питания отливок разработать метод расчетной оценки направленности затвердевания отливок, а также выбора и расчета технологических средств управления направленностью затвердевания при различных способах литья.

6. С целью повышения эффективности центробежного литья титановых сплавов в графитовые формы с вертикальной осью вращения разработать на основе математического моделирования течения расплава по каналам литейной формы в поле действия центробежных сил методики расчетов литниковых систем, распределения температуры расплава в полости формы и толщины затвердевшей корки металла на ее поверхности, а также методику расчета направленности затвердевания отливки с учетом центрифугирования твердой фазы.

7. Провести алгоритмизацию разработанных расчетных методик с целью составления соответствующих прикладных программ.

Во второй главе на основании системного анализа и обобщения производственного опыта разработана структурная схема начального

этапа автоматизированного проектирования технологических процессов литья, включающая три этапа в зависимости от объема информации: поиск аналогичных апробированных типовых или единичных ТПЛ; синтез исходного варианта технологической разработки; оценка и выбор проектных решений.

На первом этапе с помощью информационно-поисковой системы (ИПС) осуществляется поиск аналогичных апробированных единичных или типовых ТПЛ. Если в базе данных ИПС не оказалось аналогов, осуществляется синтез исходного типового варианта технологической разработки на основе решения задач выбора положения отливки в форме и типа литниковой системы. Однако, если отливка не типизирована – производится оценка и выбор лучшего проектного решения из числа предлагаемых.

Для осуществления данного подхода разработаны методологические принципы создания ИПС технологических процессов литья, а на основе теорий распознавания и принятия решений – методики реализации задач начального этапа проектирования ТПЛ и их оценки.

Оценку и выбор проектных решений на основе выбора положения отливки в форме ($j=1$), поверхности ее разъема ($j=2$) и типа литниковой системы ($j=3$) рекомендуется проводить с помощью целевых функций

$$Y_j = \sum_{i=1}^n \alpha_{ji} x_{ji} \quad (j=1, 2, 3), \quad (1)$$

для которых должны быть определены: достаточное число n критериев, влияющих на качество и надежность решений; значения весовых коэффициентов α_{ji} , характеризующих степень важности каждого i -го критерия ($i=1, \dots, n$); значения коэффициентов x_{ji} , характеризующих полноту выполнения критериев.

Для выбора критериев используется принцип декомпозиции решаемой задачи. Одним из возможных способов определения α_{ji} является метод экспертного опроса, в частности парных сравнений. Шкала для оценки критериев наряду с достаточной чувствительностью к выполнению оценки должна быть подвержена в наименьшей мере влиянию субъективности технолога.

В соответствии с данной методикой разработаны алгоритмы решения названных задач применительно к литью легких сплавов в песча-

ные формы и центробежному литью титановых сплавов в формы по выплавляемым моделям.

Для реализации второго этапа структурной схемы разработана методика формирования алгоритмов распознавания для указанных задач. Она предусматривает: разработку классификатора отливок, исходя из цели решаемой задачи; создание словаря признаков, необходимых для описания классов и распознавания отливок при решении соответствующей технологической задачи; формирование статистических или логических решающих правил.

Сформированные решающие правила служат базой для разработки алгоритмов распознавания исходных вариантов типовых решений задач начального этапа проектирования ТПЛ. В частности на основе данной методики были разработаны алгоритмы решения названных задач применительно к литью легких сплавов в песчаные формы и кокиль, сталей в формы по выплавляемым моделям и центробежного литья титановых сплавов в формы по выплавляемым моделям.

Для поиска аналогичных апробированных типовых или единичных ТПЛ разработаны методологические принципы создания ИПС технологических процессов литья. Обосновано использование ассоциативного поиска на базе дескрипторного информационно-поискового языка (ИПЯ) и критериев выдачи, позволяющих вести эшелонированную выдачу ответов.

При разработке ИПЯ технологического назначения в состав дескрипторов принято включать лишь те, которые являются следствием логического пересечения информации чертежа детали, для изготовления которой разрабатывается технологический процесс (ТП), и апробированных ТП, составляющих базу данных ИПС. Кодирование таких дескрипторов ведут по специальным таблицам. Однако использование данного метода применительно к созданию ИПЯ ТПЛ требует учета чрезмерно большого объема информации, затрудняя эксплуатацию такой ИПС. Повысить компактность ИПЯ и его семантику можно с использованием технологических дескрипторов, кодирование которых при формировании базы данных ведется по апробированным ТПЛ, а при составлении информационного запроса (ИЗ) - с помощью алгоритмов распознавания.

Разработанная функциональная структурная схема ИПС ТПЛ на базе адаптивных систем управления базами данных (ADABAS-M; FOXBASE+) дополнена подсистемой автоматизированного кодирования ИЗ.

Разработанные в соответствии с изложенными принципами ИПС ТП литых легких сплавов в песчаные формы, центробежного литья титановых сплавов, а также программы реализации алгоритмов распознавания, оценки и выбора проектных решений апробированы и переданы в промышленную эксплуатацию.

В третьей главе изложены методики расчета расхода и температуры расплава при гравитационной заливке форм (под металлостатическим напором).

Разработанная методика расчета расхода расплава в разветвленных литниковых системах отличается от известных методик тем, что наряду с определением расходных характеристик системы в целом, рассчитывается расход расплава через каждый питатель.

Последовательным решением уравнения Бернулли (при условии неразрывности потока и постоянства расхода через нижнее сечение стояка) для участков литникового хода с двумя соседними питателями, начиная с n -го и $(n-1)$ -го питателей, получена основная формула для расчета отношения расхода металла (Q_1) в очередном рассчитываемом питателе (i изменяется от $n-1$ до 1) к расходу в последнем питателе (Q_n) на ветви литникового хода:

$$K_1 = \frac{Q_1}{Q_n} = \frac{\eta_1 A}{\eta_1 + \left(\frac{S_{лх}}{S_1}\right)^2} \left\{ \sqrt{1 + \frac{(B - \eta_1 A^2) \left[\left(\frac{S_{лх}}{S_1}\right)^2 + \eta_1 \right]}{\eta_1^2 A^2}} - 1 \right\} \quad (2)$$

$$\text{где } A = \sum_{i=1}^n K_i ; \quad B = \left(\frac{S_{лх}}{S_{1+1}}\right)^2 K_{1+1}^2 + \epsilon A^2 ;$$

$$\epsilon = \lambda_{лх} \frac{L_{1+1}}{D_{лх}} + \xi_1 + \eta_{1+1} + \psi ;$$

$S_{лх}, S_1$ - площади поперечных сечений литникового хода и 1-го питателя; $D_{лх}$ - гидравлический диаметр литникового хода; η_1, ξ_1 - местные сопротивления поворота расплава из литникового хода в 1-ый питатель и прохода расплава около 1-го питателя; ψ - прочие сопротивления (например поворота литникового хода).

Также решением уравнения Бернулли для двух сечений в литниковой системе (совпадающего со свободной поверхностью расплава в

литниковой чаше и на выходе из первого питателя) получена формула для расчета расхода расплава в последнем питателе (Q_n). Используемые в расчетных формулах коэффициенты гидравлических сопротивлений (η_1, ζ_1) определены В.И. Данковым путем гидравлического моделирования.

Расчет размеров литниковых систем с использованием полученных уравнений ведется при заданном распределении расходов по питателям с учетом требуемых условий заполнения рабочей полости литейной формы, что в первую очередь важно для крупногабаритных фасонных отливок.

Минимально допустимый расход расплава в питателе Q_n определяется из условия недопущения снижения температуры головной части потока ниже ликвидуса (t_n) в конце заполнения формы решением уравнения теплового баланса:

$$Q_n = \frac{b_{21} \sum_{i=1}^N \alpha_{k1} P_i L_i}{c'_1 \rho'_1 (b'_1 + b_2) \ln \frac{t_0 - t_{2n}}{t_n - t_{2n}}}, \quad (3)$$

где b_2 - коэффициент аккумуляции теплоты формы; α_{k1} - коэффициент теплоотдачи конвекцией от потока расплава к поверхности формы на 1-ом участке; P_1 - периметр поперечного сечения 1-го участка полости формы ($i=1, \dots, N$); L_1 - длина этого участка; c'_1, ρ'_1, b'_1 - удельная теплоемкость, плотность и коэффициент аккумуляции теплоты жидкого металла; t_0, t_{2n} - начальные температуры расплава и формы.

Расчет распределения температуры расплава в полости формы в конце ее заливки также выполняется на основе решения уравнения теплового баланса головной части потока расплава, но отнесенного к 1-му участку полости формы и учитывающего прогрев формы за время течения металла на этом участке до полного ее заполнения:

$$t_{11} = t_{2n} + \beta_1 (t_0 - t_{2n}) \exp \left[- \frac{b_{21} \sum_{i=1}^N \alpha_{k1} P_i L_i}{c'_1 \rho'_1 Q_n (b'_1 + b_2)} \right], \quad (4)$$

где β_1 - коэффициент, учитывающий прогрев формы на 1-ом участке до заполнения формы и равный отношению температур расплава (отсчитыва-

емой от начальной температуры формы) на 1-ом участке с учетом прогрева формы за время ее заполнения и без учета этого прогрева (первая температура определялась по методике, предложенной профессором Баландиным Г.Ф.).

Для расчета распределения температуры в расплаве заполнившем кокиль, на основе теории теплопроводности разработан расчет эффективного коэффициента аккумуляции теплоты стенки кокиля с учетом термического сопротивления слоя кокильной краски для стадии заливки кокиля.

Разработанные методики алгоритмизированы и реализованы в виде прикладных программ для персональных компьютеров, которые были апробированы на ряде предприятий. Анализ разработанных литниковых систем с использованием указанных программ подтвердил их адекватность и эффективность.

В четвертой главе изложены исследования, направленные на развитие метода поузлового расчета затвердевания отливок в отношении его инвариантности к геометрии отливок, их сплавам и видам литейных форм и разработка на основе этого методики расчета направленности затвердевания отливок.

Основными предпосылками использования методики поузлового расчета направленности затвердевания отливок при автоматизированном проектировании ТПЛ является снижение трудоемкости расчетов по сравнению с применением численных методов для решения аналогичных задач при достаточной достоверности получаемых результатов. Важным достоинством является также возможность решения обратных задач расчета технологических средств воздействия, обеспечивающих требуемую направленность затвердевания отливки.

Методологические основы поузлового расчета затвердевания отливок разработаны в МАТИ им. К.Э. Циолковского под научным руководством профессора Неуструева А.А. В настоящей работе данный метод получил дальнейшее развитие и обобщение для автоматизированного проектирования ЛПС сложных отливок при различных способах литья.

В соответствии с этим сущность разработанной методики состоит в следующем:

1. Для определения направленности затвердевания фасонной отливки от наиболее удаленного от верхней прибыли ее элемента (узла) к подприбыльному элементу выполняют расчеты времени затвердевания выделенных в этом направлении массивных частей узлов и соединяющих

их элементов (стенок отливки), в которых вероятно нарушение направленности затвердевания.

2. В процессе затвердевания узлов отливки, состоящих из элементов с разными приведенными размерами, происходит взаимное наложение во времени стадий отвода теплоты перегрева, затвердевания и охлаждения металла. Для учета этого явления в расчетах продолжительности затвердевания массивной части узла предложены эквивалентные физические константы сплава и соответствующая эквивалентная начальная температура расплава, заполнившего форму.

3. Инвариантность разработанной методики расчета направленности затвердевания отливок как при литье в песчаную форму, так и при литье в кокиль и по выплавляемым моделям достигнута применением эффективных коэффициентов аккумуляции теплоты ($b_{3\phi}$) кокилей и форм по выплавляемым моделям с опорным наполнителем и без него.

Расчетные формулы для определения $b_{3\phi}$ кокиля или оболочковой формы получены на основании условия замены реальной формы эквивалентной ей в тепловом отношении полуограниченной формой. Удельный тепловой поток на поверхности реальной формы определяется на основе закона теплопроводности Фурье и аналитического решения задачи теплопроводности о температурном поле стенки формы. Удельный тепловой поток для эквивалентной формы определяется по известной формуле для теплового потока в полуограниченную форму. На основе равенства указанных тепловых потоков можно найти эффективный коэффициент аккумуляции теплоты формы для данного момента времени. Однако для расчета времени затвердевания отливки рационально использование среднего за это время значения $b_{3\phi}$, что упрощает расчеты при достаточной точности результатов. Поэтому уравнение для определения среднего $b_{3\phi}$ имеет вид:

$$-\lambda_2 \frac{\overline{\partial t_2(0, \tau)}}{\partial x} = \frac{2b_{3\phi}}{\sqrt{\pi\tau}} (t_{1п} - t_{2н}), \quad (5)$$

где λ_2 - коэффициент теплопроводности формы; $t_{1п}$ - температура на поверхности отливки; $\frac{\overline{\partial t_2(0, \tau)}}{\partial x}$ - средний за время τ градиент температуры на поверхности формы.

На основании уравнения (5) получены формулы для расчетов $b_{\text{ж.к}}$ кокиля¹⁾ и форм по выплавляемым моделям с опорным наполнителем и без него²⁾.

4. Продолжительность затвердевания массивной части узла произвольной конфигурации (рис. 1) определена решением уравнения теплового баланса. В соответствии с принципом суперпозиции сумма теплоты, выделенной массивом при затвердевании ($Q_{\text{м}}$), и притоков теплоты в массив ($Q_{\text{п. j}}$) из соседних узлов (j) отливки равна сумме стоков теплоты из массива ($Q_{\text{с. i}}$) в форму, стержни, сопряженные с массивом тонкие элементы и др. (1):

$$Q_{\text{м}} + \sum Q_{\text{п. j}} = \sum Q_{\text{с. i}}. \quad (6)$$

В связи с тем, что при определении стоков и притоков теплоты учитываются в основном теплообмен теплопроводностью, аккумуляция теплоты полуограниченной формой и выделение теплоты при затвердевании, в формулах для расчетов $Q_{\text{п. j}}$, $Q_{\text{с. i}}$ и $Q_{\text{м}}$ содержится время в степенях 1, 1/2 и 0. Поэтому уравнение теплового баланса массива узла (6), определяющее время его затвердевания ($\tau_{\text{зм}}$), приведено к виду:

$$A\tau_{\text{зм}} + B\sqrt{\tau_{\text{зм}}} + C = 0, \quad (7)$$

$$\text{из которого } \tau_{\text{зм}} = \left(\frac{\sqrt{B^2 - 4AC} - B}{2A} \right)^2 \text{ или } \tau_{\text{зм}} = (C/B)^2 \text{ при } A=0,$$

где A, B, C – суммы комплексов, учитывающих соответствующие стоки и перетоки теплоты и определяемых отдельными расчетными модулями.

5. Для определения стоков и перетоков теплоты, определяющих продолжительность затвердевания узла отливки, решены соответствующие задачи методами теории теплопроводности и тепловой теории литья.

Стоки теплоты из массива узла в форму и стержни определены на основе тепловой теории литья и дополнительного решения задачи теплопроводности о нагреве стержня.

Влияние внешнего угла формы и галтели на сток теплоты из отливки определено на основе решения задачи теплопроводности о тепловых потоках через поверхности галтели и участка внешнего угла, приведенного в работе С. П. Колесникова.

Стоки теплоты теплопроводностью из массива в сопряженные с

1) – при участии В. А. Черного. 2) – при участии А. Ф. Смыкова.

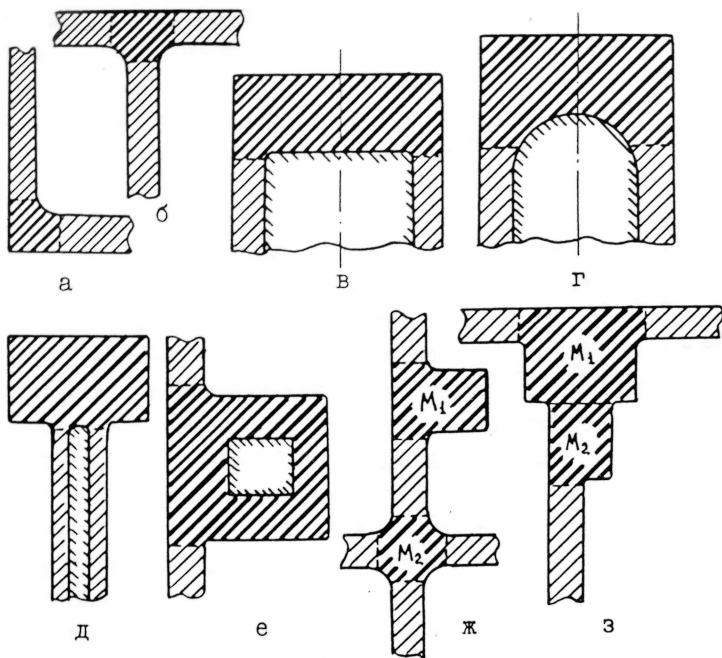


Рис. 1 Схемы узлов отливок (массивы узлов выделены штриховкой): а - L-образный узел; б - Т-образный узел; в - массив, часть плоской поверхности которого оформлена стержнем; г - массив, цилиндрическая поверхность которого оформлена стержнем; д - элемент, сопряженный с массивом, оформлен стержнем; е - массив с полостью, оформленной стержнем; ж - два массива ($M_1 > M_2$), соединенные элементом отливки; з - два массива ($M_1 > M_2$), сопряженные между собой

ним тонкие элементы узла определены решением задачи теплопроводности для элемента конечной длины. При этом учитываются морфология затвердевания сплава, изменение теплового потока, отводимого из массива в тонкий элемент на стадиях его затвердевания и охлаждения в твердом состоянии, а также влияние на тепловой поток внешнего угла формы, образованного в пересечении поверхностей массива и элемента. Если тонкий элемент имеет внутреннюю полость, оформленную керамическим стержнем (рис. 1, д), то для расчета стока теплоты из массива в этот элемент определяется суммарный эффективный коэффициент аккумуляции теплоты формы и стержня.

На основе решения задачи теплопроводности для элемента отливки, соединяющего два разных массива соседних узлов (рис. 1, ж), определено условие, когда происходит сток теплоты из обоих массивов в соединяющий их элемент или переток теплоты из одного массива в другой через этот элемент. Определены также значения стока или перетока теплоты в этих массивах соседних узлов. Решением приближенной задачи теплопроводности определен переток теплоты между двумя массивами, сопряженными друг с другом (рис. 1, з).

6. При затвердевании отливок из сплавов с низкой теплопроводностью, а также при высокой интенсивности их охлаждения (например в кокилях) в массивах узлов могут образовываться перепады температур. Величина этих перепадов является функцией критерия Био (B_1), численно равного относительному термическому сопротивлению массива.

Влияние термического сопротивления рассматриваемого массива узла на время его затвердевания определяется с помощью критерия ψ , являющегося численной характеристикой неравномерности температурного поля отливки в процессе затвердевания. Известно, что при регулярном тепловом режиме величина ψ изменяется от 1 до 0 при изменении B_1 от 0 до ∞ соответственно. Аналогичный коэффициент ψ найден для иррегулярного теплового режима охлаждения тел трех классов:

$$\psi = \left(\frac{\sqrt{1 - K_1 B_1^2} - K_2 B_1}{1 - K_3 B_1^2} \right)^2 \quad (8)$$

где $K_1=0,122$; $K_2=0,305$; $K_3=0,215$ - для тел класса "неограниченная пластина";

$K_1=0,2$; $K_2=0,5$; $K_3=0,45$ - для тел класса "неограниченный цилиндр";

$K_1=0,21$; $K_2=0,7$; $K_3=0,7$ - для тел класса "шар".

При определении зависимостей ψ от B_1 были использованы известные аналитические решения задач теплопроводности для тел указанных классов при граничном условии 3-го рода. С использованием найденного значения ψ время затвердевания массива узла отливки с учетом его термического сопротивления равно:

$$\tau_{3м} = \tau_{3м} / \psi, \quad (9)$$

где $\tau_{3м}$ - время затвердевания массива, вычисленное без учета его термического сопротивления.

В соответствии с изложенной методикой поузлового расчета направленности затвердевания отливок разработан алгоритм (рис. 2) инвариантный к геометрии и теплофизическим свойствам сплавов отливок, а также видам литейных форм (песчаная форма - SL=1; кокиль - SL=2; формы по выплавляемым моделям с опорным наполнителем и без него - SL=3). Данный алгоритм имеет модульную структуру, что при необходимости позволяет дополнять расчет новыми видами стоков и перетоков теплоты.

Для проверки адекватности прикладной программы, реализующей разработанный алгоритм, расчетные данные сравнивали с временем затвердевания для ряда экспериментальных и промышленных отливок разной конфигурации из разных сплавов при литье в песчаные формы, кокиль и формы по выплавляемым моделям. Анализ сравнения показал удовлетворительную сходимость расчетов и экспериментов (отклонения до 7%).

Апробация программы проведена в производственных условиях, на основании чего передана ряду предприятий в промышленную эксплуатацию.

В пятой главе на основании анализа известных конструкций литниковых систем для центробежного литья титановых сплавов в графитовые формы с вертикальной осью вращения, а также особенностей формирования титановых отливок выделен ряд проблем, решение которых способствует как повышению качества получаемых литых заготовок, так и дальнейшему развитию автоматизированного проектирования литниково-питающих систем центробежного литья титана.

В работе были решены следующие задачи: разработана методика расчета течения металла по каналам формы в поле центробежных сил;

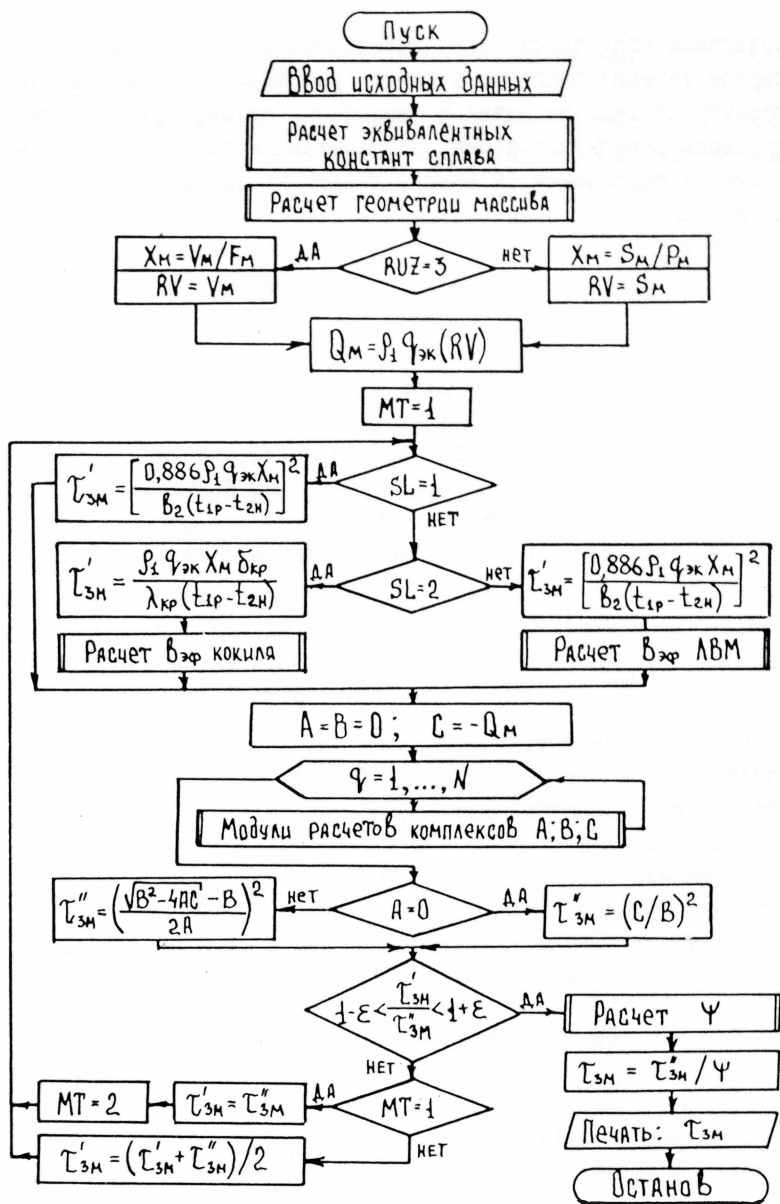


Рис. 2 Блок-схема алгоритма расчета продолжительности затвердевания массивов узлов отливок: RUZ - код размерности узла (2-двухмерный; 3-трехмерный); X_M, S_M, P_M, V_M - приведенный размер, площадь, периметр и объем массива соответственно; ρ_1 - плотность сплава в твердом состоянии; $q_{эк}$ - эквивалентная теплота кристаллизации сплава; b_2 - коэффициент аккумуляции теплоты оболочки формы; t_{1P} - средняя расчетная температура отливки в процессе затвердевания; $\lambda_{кр}, \delta_{кр}$ - коэффициент теплопроводности кокильной краски и её толщина соответственно

создана новая конструкция литниковой системы, исключая безнапорное течение расплава в форме; разработана методика расчета температур потока расплава и нарастания затвердевшей корки металла в процессе заполнения формы; разработана методика расчета направленности затвердевания отливки с учетом центрифугирования твердой фазы металла.

Исходя из анализа течения расплава по каналам литейной формы в поле центробежных сил и в соответствии с работой профессора Ходоровского Г. Л., были выделены три основные стадии движения металла от сливного лотка до полного заполнения формы:

- раскручивание металла в стояке и выход в радиальный литниковый ход с некоторой начальной скоростью;
- разгон металла в радиальном литниковом ходе;
- обратное движение металла в форме и литниковом ходе в соответствии с параболомом вращения.

Формула для расчета времени истечения из стояка

$$\tau = \frac{\pi R^2}{S_b g} \left(\sqrt{2g \frac{V_0}{\pi R^2} + \frac{R^2 \omega^2}{2}} - \frac{R\omega}{\sqrt{2}} \right) \quad (10)$$

получена решением уравнения Бернулли во вращающейся системе координат, где: R - радиус стояка; S_b - площадь выходного отверстия из стояка; g - ускорение свободного падения; V_0 - начальный объем расплава металла в стояке; ω - угловая скорость вращения стояка.

Течение расплава в незаполненном радиальном литниковом ходе при вращательном движении описано одномерным уравнением Навье-Стокса с учетом центробежной силы и силы гидравлического трения. В результате получена система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial \tau} + \vartheta \frac{\partial S}{\partial x} + S \frac{\partial \vartheta}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\vartheta^2 \left(\beta - \frac{1}{2} \right) \right) + ((\beta-1)/S) \vartheta^2 \frac{\partial S}{\partial x} &= \omega^2 x - \vartheta^2 \frac{\alpha}{2} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где S - сечение заполненной части радиального литникового хода (ЛХ); ϑ - скорость течения расплава по радиальному ЛХ; x - координата

ната вдоль ЛХ; β - коэффициент Буссинеска; α - коэффициент, учитывающий гидравлические потери.

Решение данной системы уравнений с соответствующими начальными и граничными условиями получено конечно-разностной аппроксимацией в виде неявной схемы "бегущего счета" относительно S и θ .

Скорости обратного движения фронта металла в рабочей полости формы определяются из решения уравнения материального баланса для объема расплава за параболоидом (V) методом Ньютона для каждого рассчитываемого момента времени:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \quad (12)$$

где V_1, V_2 - объемы расплава в радиальном и вертикально расположенной части ЛХ; V_3 - объем расплава в форме.

Проверка адекватности программы реализации разработанной методики расчетов кинетики заполнения формы расплавом показала удовлетворительную сходимость расчетных данных с результатами гидромоделирования.

Для повышения производительности, исключения безнапорного течения расплава и снижения пульсаций потока при заполнении рабочей полости формы расплавом разработана новая конструкция тангенциально-вентиляторной литниковой системы (ЛС). Суть ее состоит в том, что в нижней расширяющейся части стояка выполнены изолированные полости, разделенные лекальными лопатками, продолжениями которых являются радиальные литниковые ходы, сужающиеся пропорционально увеличению скорости потока и направленные навстречу вращению.

Разработанная ЛС прошла производственное опробование и передана в промышленную эксплуатацию. На ее конструкцию получен патент.

С целью оптимизации исполняемых размеров элементов литниковой системы и регулирования температуры заливки сплава на этапе проектирования технологического процесса разработана методика расчета температуры расплава и толщины затвердевшей корки металла на поверхности формы в конце ее центробежной заливки. Для проведения расчетов отливку разбивают на элементы простой конфигурации постоянного сечения плоскостями, перпендикулярными направлению тока. Расчет ведется поэлементно решением уравнения теплового баланса как для головной части потока расплава, так и для каждого заполненного участка формы расплавом. Расходные характеристики определяются согласно (10), а нарастание твердой корки - по известным зависимостям для затвердевания титановых сплавов.

Программа реализации данной методики определяет температуру головной части потока расплава, которая должна быть не ниже температуры нулевой жидкотекучести сплава. Проверяется также толщина затвердевшей корки, чтобы не происходило перемерзания канала или расплавления корки и образования пригара.

Расчет направленности затвердевания отливки при центрифугировании твердой фазы ведется на основе метода поузлового расчета. После декомпозиции отливки на элементы с учетом направления движения твердой фазы в узле под действием центробежной и кориолисовой сил сначала рассчитывается время затвердевания элементов без учета центрифугирования твердой фазы, но при фактических граничных и начальных условиях. Наряду с временем затвердевания j -го элемента (τ_j) определяется также и степень развития в нем объемного затвердевания (K_{zj}). Величина K_{zj} численно выражает долю, которую составляет приведенный размер центральной двухфазной области элемента отливки с объемным характером затвердевания от приведенного размера элемента.

Во второй части расчета учитывается влияние центрифугирования твердой фазы на τ_j . Основу этого расчета составляет уравнение материального баланса элемента, учитывающее объем металла затвердевшего в виде корки на поверхности формы в j -ом элементе, объем твердой фазы, образовавшейся в этом элементе и задержанной в нем при центрифугировании из элементов, расположенных ближе к оси вращения.

Результаты расчетного анализа с помощью программ реализации данной методики показали значительное влияние центрифугирования твердой фазы на направленность затвердевания отливок разной конфигурации. Это позволяет разрабатывать рациональные системы их питания.

В шестой главе рассмотрена разработка метода расчетной оценки непрерывности питания отливок и расчета технологических средств воздействия на направленность их затвердевания.

Для оценки непрерывности питания отливки использованы известные из литературы критерии в виде относительного временного градиента (G_τ) и отношения температурного градиента к линейной скорости затвердевания (K_c) соответственно для отливок из сплавов с узким и широким интервалами кристаллизации. Расчет G_τ и K_c ведется по методике, разработанной на основе аналитического решения математичес-

ких моделей, описывающих распределение температуры в протяженном элементе отливки с учетом влияния как сопряженного с ним массива, так и торца элемента. Сравнение полученных значений G_{τ} и K_c с их критическими значениями позволяют прогнозировать образование усадочных дефектов.

С целью обеспечения направленности затвердевания и непрерывности питания отливок при разных способах литья применяют прибыли, технологические напуски и различные технологические средства управления направленностью затвердевания.

Основой для определения размеров прибыли как круглого, так и овального сечений, служат метод поузлового расчета затвердевания и известные рациональные соотношения (K) между временем затвердевания массива отливки ($\tau_{3м}$), на котором установлена прибыль, и временем ее затвердевания ($\tau_{3п}$):

$$\tau_{3п} = K \cdot \tau_{3м} \quad (13)$$

Величина $\tau_{3м}$ определяется методом поузлового расчета. Величина $\tau_{3п}$ входит в уравнение теплового баланса прибыли:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (14)$$

где Q_1 - теплота, выделяющаяся при затвердевании прибыли; Q_2 - теплота, отводимая в форму; Q_3 - теплота, отводимая теплопроводностью в подприбыльный массив отливки; Q_4 - теплота, отводимая излучением для открытых прибыли (для закрытых прибыли $Q_4=0$).

Все размеры прибыли в уравнении (14) выражены через один характерный размер. В результате этого оказывается возможным рассчитывать его решением уравнений (13) и (14). В расчетах Q_1 учтено уменьшение объема металла в прибыли за счет его расхода на компенсацию усадки при затвердевании части отливки, питаемой прибылью.

Размеры технологических напусков на вертикальных протяженных элементах (стенках) отливок определяются на основании расчета критерия G_{τ} или K_c (в зависимости от морфологии затвердевания сплава) на разном удалении от массива, сопряженного сверху с элементом, и от его нижнего торца и сравнения с критическим значением $(G_{\tau})_{кр}$ или $(K_c)_{кр}$. По условию $G_{\tau 1} < (G_{\tau})_{кр}$ или $K_{c 1} < (K_c)_{кр}$ определяется длина участка $l_{тн}$, где требуется напуск. Толщина технологического напуска также определяется на основе анализа указанных критериев.

Одним из наиболее распространенных технологических средств, уменьшающих время затвердевания массивов (бобышек, фланцев и др.) узлов или протяженных элементов отливок до требуемого значения

(τ_p) для создания направленного затвердевания, являются металлические холодильники. Для литья в песчаную форму рассчитываются размеры холодильника и толщина слоя краски на его поверхности (при выбранном материале холодильника и составе краски). Для этого используется метод поузлового расчета затвердевания с учетом установки холодильника на части поверхности массива узла.

Влияние холодильника, устанавливаемого на наружной поверхности оболочки формы по выплавляемым моделям без опорного наполнителя, на затвердевание узла отливки определено с помощью эффективного коэффициента аккумуляции теплоты оболочки с холодильником. Для его расчета разработана методика с учетом коэффициента теплоотдачи от оболочки в холодильник и функции нестационарности теплового режима холодильника. С помощью программы реализации данной методики проведен расчетный анализ эффективности применения металлических холодильников для литья в формы ЛВМ (в частности в корундовые формы толщиной 9-10 мм отливок из сплава ЖС6У), который показал, что холодильник в несколько (в 4-5) раз увеличивает скорость затвердевания, если его начальная температура не превышает 100-150°C и имеет рациональную толщину (~ 10 мм). Если начальная температура холодильника равна начальной температуре оболочки формы (900-1000°C), то увеличение скорости затвердевания не более 20%.

Созданные в данной работе методы проектирования ЛПС и технологических средств управления затвердеванием отливок на основе решения комплекса технологических задач можно представить в виде структурной схемы, изображенной на рис. 3. Схема проектирования ЛПС содержит четыре основных блока, в которых последовательно решаются задачи, начиная с выбора единичного или типового ТПЛ и заканчивая синтезом ЛПС. Главная особенность схемы проектирования технологических средств управления затвердеванием состоит в том, что она позволяет рассчитывать рациональные средства воздействия на отливку любой конфигурации с целью предупреждения образования усадочных дефектов. Для этого выполняется расчет требуемых значений эффективного коэффициента аккумуляции теплоты формы ($b_{\phi.т.}$) для участка отливки, на котором нарушена направленность затвердевания, т.е. $G_{\tau 1} < (G_{\tau})_{кр}$ или $K_{c1} < (K_c)_{кр}$. По найденным значениям $b_{\phi.т.}$ производят выбор средства воздействия на затвердевание рассматриваемого участка отливки. Для расчета параметров выбранного средства воздействия используется значение $b_{\phi.т.}$ и программы реализации

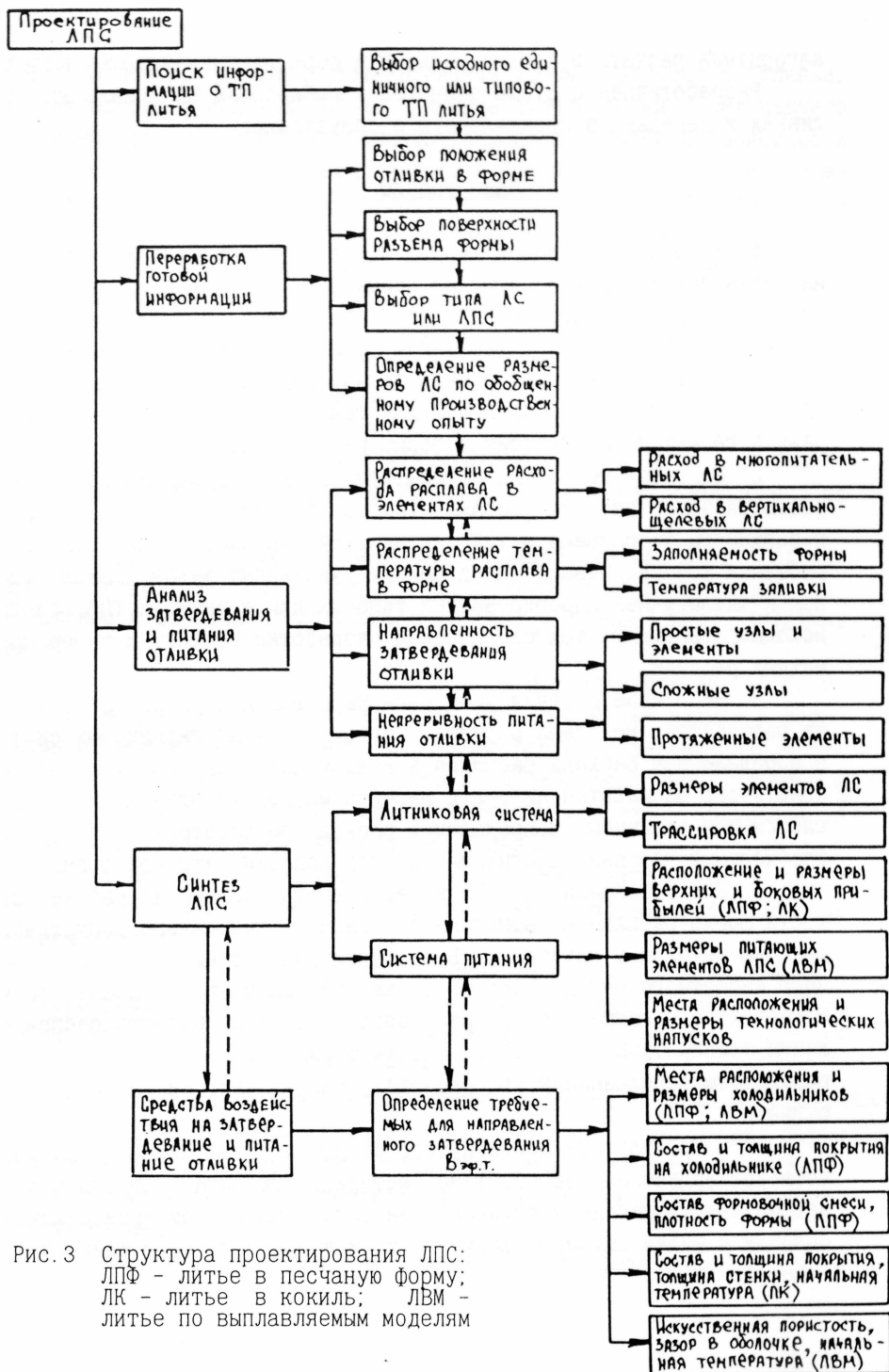


Рис. 3 Структура проектирования ЛПС:
ЛПФ - литье в песчаную форму;
ЛК - литье в кокиль; ЛВМ -
литье по выплавляемым моделям

алгоритмов расчета $b_{\text{ж}}$ для кокилей и форм по выплавляемым моделям.

Разработанная система расчетов апробирована на реальных отливках и передана в промышленную эксплуатацию.

Общие выводы

1. На основе тепловой теории литья путем разработки и решения математических моделей литейных процессов, системного анализа и использования кибернетических методов решения эвристических задач автоматизированного проектирования ТПЛ разработаны оригинальные методики решения комплекса технологических задач, объединенные в единый метод проектирования ЛПС для гравитационного литья отливок разной геометрии и в литейные формы разных видов.

2. На начальном этапе автоматизированного проектирования ЛПС решаются эвристические задачи (выбор положения отливки в форме, поверхности ее разъема и типа литниковой системы). Для этого разработана трехуровневая схема решения указанных задач, включающая поиск аналогичных апробированных типовых или единичных ТПЛ, синтез исходного варианта технологической разработки, оценку и выбор проектных решений.

3. На основе решения уравнений Бернулли и неразрывности потока разработана методика расчета многопитательных литниковых систем с определением расхода расплава в каждом питателе системы. На основе этого разработан алгоритм расчета многопитательных литниковых систем при заданном распределении расхода по питателям, исходя из необходимых условий заполнения рабочей полости литейной формы.

4. На основании условия качественного заполнения рабочей полости формы расплавом выполняется расчет минимально-допустимого расхода металла в питателе. В соответствии с этим, а также на основе известного метода расчета охлаждения расплава в каналах формы с учетом ее нагрева потоком разработана методика расчета распределения температуры расплава в полости формы в конце ее заливки. Эти результаты использованы в расчетах направленности затвердевания отливок.

5. В результате достигнутого развития поузлового метода расчета затвердевания разработана методика расчета направленности затвердевания фасонных отливок, инвариантная к геометрии отливок, сплавам и видам литейных форм. Методика основана на решении урав-

нения теплового баланса затвердевания узлов и элементов отливки, составленного с использованием принципа суперпозиции и включающего различные стоки и перетоки теплоты теплопроводностью в зависимости от геометрии отливки и отвод теплоты в формы разных видов и стержни, оформляющие внутренние полости и участки наружной поверхности отливки. Влияние термического сопротивления рассчитываемого массива на время его затвердевания при высокой относительной интенсивности охлаждения отливок учитывается с помощью расчетного коэффициента, аналогичного принятому для регулярного теплового режима.

Установлено, что инвариантность расчетов затвердевания отливок в разных литейных формах с ограниченной аккумулирующей способностью (кокили, оболочковые формы) достигается применением расчетных эффективных коэффициентов аккумуляции теплоты форм, учитывающих наряду с их аккумулирующей способностью условия теплообмена на поверхностях.

Инвариантный алгоритм реализации данного метода имеет модульную структуру, что позволяет при необходимости учитывать новые виды стоков и перетоков теплоты в отливках и новые виды литейных форм.

6. Сравнительный анализ результатов математического и физического моделирования показал, что математические модели и алгоритмы их реализации адекватно описывают процессы затвердевания отливок как из узкоинтервальных, так и широкоинтервальных сплавов в песчаных формах, кокилях и по выплавляемым моделям, соответствующая физической сущности рассматриваемых явлений.

7. С целью совершенствования технологии центробежного литья титановых сплавов в графитовые формы с вертикальной осью вращения решены задачи:

- расчета течения расплава по каналам формы с учетом уменьшения его уровня в стояке, центробежной силы и силы гидравлического трения на основе решения математической модели процесса с использованием уравнений Бернулли и Навье-Стокса;

- исключения безнапорного течения расплава в радиальном литниковом ходе и снижения пульсации потока при заполнении формы расплавом за счет разработки новой конструкции литниковой системы, способствующей освоению производства более протяженных и тонкостенных отливок;

- расчета температуры расплава и толщины затвердевшей корки

металла на поверхности формы в конце ее заливки;

- поузлового расчета направленности затвердевания отливок с учетом явления центрифугирования частиц твердой фазы, позволяющего разрабатывать рациональные системы питания отливок.

8. Для расчетной оценки направленности затвердевания и непрерывности питания отливок разработана методика расчета относительных временного и температурного градиентов для отливок из сплавов с узким и широкими интервалами кристаллизации соответственно. Сравнение полученных расчетных значений критериев с критическими позволяет прогнозировать образование усадочных дефектов.

9. Для предупреждения образования усадочных дефектов отливок разработаны методики расчета прибылей, технологических напусков и разных технологических средств управления направленностью затвердевания. Расчет открытых и закрытых прибылей ведется на основе решения уравнения теплового баланса с учетом расхода металла из прибыли на компенсацию усадки питаемой части отливки при известном времени затвердевания ее подприбыльного элемента. Расчет технологического напуска производится в соответствии с морфологией процесса затвердевания отливки. Решением математической модели температурного поля торцевой части протяженного элемента и уравнения теплового баланса массива узла разработана методика расчета холодильников, устанавливаемых в песчаные формы, а с помощью эффективного коэффициента аккумуляции теплоты - холодильников для оболочкового литья.

10. Разработан метод выбора и расчета технологических средств управления направленностью затвердевания отливок при литье в песчаную форму, в кокиль и по выплавляемым моделям, содержащий методики оценки направленности затвердевания отливки по критериям непрерывности питания, расчета требуемых значений эффективного коэффициента аккумуляции теплоты участков формы, выбора и расчета на основании этого технологических средств, обеспечивающих направленность затвердевания отливки.

11. На основе комплексного решения задач проектирования ЛПС для ряда предприятий были разработаны технологические процессы литья в песчаные формы, кокиль и по выплавляемым моделям, позволяющие добиться значительной экономии металла на ЛПС при удовлетворительном качестве отливок.

Результаты работы в виде пакетов прикладных программ и мето-

дик проектирования ЛПС переданы в промышленную эксплуатацию.

Разработанные математические модели, методики расчетов и программное обеспечение внедрены в учебный процесс МАТИ им. К. Э. Циолковского.

Основное содержание диссертации изложено в работах:

1. Моисеев В.С., Неуструев А.А., Макарин В.С. Алгоритмизация решения задачи выбора положения отливки в форме // Передовой производственный опыт. -1984. - N 11. - С.14-15.
2. Моисеев В.С., Неуструев А.А., Макарин В.С. Проектирование технологии получения отливок из алюминиевых сплавов в формы из ХТС с помощью ЭВМ // Внедрение литейных алюминиевых сплавов в изделиях отрасли. -М., 1984. - С.18-19.
3. Моисеев В.С., Неуструев А.А., Макарин В.С. Выбор поверхности разреза формы с помощью ЭВМ // Литейное производство. -1985. -N 12. - С.12-13.
4. Моисеев В.С., Неуструев А.А., Ходоровский Г.Л. Разработка информационно-поисковой системы для проектирования технологии литья легких сплавов // Прогрессивная технология, автоматизация и применение ЭВМ в литейном производстве. -Алма-Ата, 1987. -С. 121-124.
5. Моисеев В.С., Данков В.И. Автоматизация решения задачи выбора типа литниковой системы // Литейное производство. -1987. -N10. -С. 12-13.
6. Моисеев В.С., Неуструев А.А. Перспективы использования ИПС для автоматизированного проектирования технологии литья // Применение ЭВМ для разработки технологических процессов литья, проектирования оснастки и анализа качества отливок. -Андропов, 1987. -С. 12-13.
7. Моисеев В.С., Данков В.И. Методика алгоритмизации решения задачи выбора типа литниковой системы // Труды XI НТК МУИС МАТИ. -М., 1988. -С. 31-34.
8. Моисеев В.С., Данков В.И. Автоматизированное проектирование и расчет литниковых систем отливок из легких сплавов // Труды XII НТК МУИС МАТИ. -М., 1989. -С. 72-74.
9. Моисеев В.С., Данков В.И. Алгоритмизация решения задач проектирования технологии литья легких сплавов в кокиль // Проблемы производства отливок: производительность, качество, экономия. -Пермь, 1989. -С. 41-44.

10. Моисеев В.С., Неуструев А.А. Решение задач первого уровня САПР ТП литья // Литейное производство. - 1989. -N10. -С. 23-25.
11. Моисеев В.С., Неуструев А.А. Прикладная программа расчета затвердевания отливок из низкотеплопроводных сплавов // Литейное производство. - 1990. -N10. -С. 5.
12. Моисеев В.С., Данков В.И., Багаев И.И. Особенности САПР технологии центробежного литья титановых сплавов // Литейное производство. - 1991. - N 10. -С. 25.
13. Моисеев В.С. Разработка математической модели процесса заполнения формы при центробежной заливке // Проблемы литейной технологии. -Пермь, 1991. -С. 40-43.
14. Моисеев В.С., Неуструев А.А. Методология автоматизированного проектирования литниково-питающих систем // Литейное производство. - 1992. -N12. -С. 9.
15. Моисеев В.С., Вабищевич П.Н., Павлов В.Н. Математическое моделирование процессов течения металла по каналам формы при центробежной заливке // Прогрессивные технологические процессы и высококачественные сплавы в литейном производстве. -Рыбинск, 1995. -С. 10-14.
16. Моисеев В.С. Компьютерные модели направленности затвердевания и непрерывности питания отливок из жаропрочных и легких сплавов // Новые материалы и технологии. -М., 1995. -С. 50-51.
17. Моисеев В.С., Неуструев А.А., Серебряков С.П. Литниковая система для центробежного фасонного литья с вертикальной осью вращения // Открытия. Изобретения. -1996. -N40. -С. 70.
18. Неуструев А.А., Моисеев В.С. Разработка и использование информационно-поисковой системы для проектирования технологии литья // Литейное производство. - 1987. -N10. -С. 10-11.
19. Неуструев А.А., Моисеев В.С., Данков В.И. Автоматизированное проектирование литниковых систем отливок из легких сплавов // Труды ЛПИ. -1989. -N433. -С. 62-67.
20. Неуструев А.А., Моисеев В.С., Ходоровский Г.Л. Компьютеризация расчетов получения титановых отливок // Литейное производство. - 1991. -N10. -С. 13-14.
21. Неуструев А.А., Моисеев В.С. Автоматизированное проектирование технологических процессов литья. -М.:МГАТУ, 1994. -256 с.

22. Неуструев А.А., Моисеев В.С. Компьютерная модель формирования фасонных отливок // Кристаллизация: компьютерные модели, эксперимент, технология. -Ижевск, 1994. -С. 61-63.
23. Неуструев А.А., Моисеев В.С. Расчеты средств воздействия на затвердевание отливок в САПР литейной технологии // Литейное производство. - 1995. -№12. -С. 21-23.