

Тихомиров Максим Дмитриевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И УСАДОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ
ЗАТВЕРДЕВАНИИ ОТЛИВОК ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ
КОМПЬЮТЕРНОГО АНАЛИЗА ЛИТЕЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

Специальность 05.16.04. – «Литейное производство»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2005

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии
«Центральный научно–исследовательский институт материалов»

Научный руководитель:

доктор технических наук, старший научный
сотрудник Абрамов Алексей Александрович.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Десницкий Владимир Владимирович;
кандидат технических наук,
Срыбник Алексей Дмитриевич.

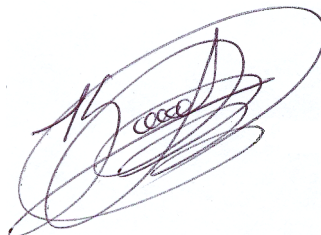
Ведущая организация: ОАО «Звезда», г. Санкт-Петербург

Защита состоится «___» _____ 2005 г. в _____ часов на заседании
диссертационного совета Д 212.229.14 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский гос-
ударственный политехнический университет»
по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, ГОУ
«СПбГПУ», химический корпус, ауд. 51.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ
ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан «___» _____ 2005 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.14
доктор технических наук, профессор



Кондратьев С.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. К свойствам сплавов работающих в сложных или особо ответственных условиях, предъявляются специальные требования. В целях удовлетворения таких требований, разработчиками сплавов (в том числе в ЦНИИМ) были разработаны литейные алюминиевые сплавы самого широкого спектра по химическому составу, которые относят к группе так называемых высокопрочных алюминиевых сплавов: АЛ9М, АЛ24С, АЛ24П, ВАЛ10, АЛ23-1 и др. Многие высокопрочные алюминиевые сплавы склонны к повышенной микропористости, макропористости и другим литейным дефектам. Кроме того, для достижения высоких механических свойств необходимы высокие скорости охлаждения и использование различных специальных способов литья: ЛПД, ЛНД, ЛКД (жидкая штамповка), ВПФ с вакуумированными холодильниками и т.п. При этом существенно ужесточаются условия формирования отливки и традиционные методы разработки литейной технологии не всегда позволяют обеспечить требуемое качество изделия. Такое положение делает применение в литых деталях высокопрочных сплавов крайне затруднительным и иногда ставит под вопрос как способ получения детали (литье), так и применение сплава. В 1989 г. в связи с тем, что ЦНИИМ проводил внедрение группы высокопрочных алюминиевых сплавов для ряда отливок специального назначения, было начато выполнение данной работы по обеспечению возможности использовать компьютерное моделирование литейных процессов при разработке литейных технологий для высокопрочных алюминиевых сплавов.

В диссертационной работе рассмотрен комплекс актуальных вопросов компьютерного моделирования литейной технологии. Разработаны модели и алгоритмы, позволяющие проводить адекватное моделирование процессов затвердевания и образования усадочных дефектов, что позволяет разрабатывать эффективные и бездефектные литейные технологии для отливок повышенной сложности и специальными требованиями по качеству.

Цель работы - обеспечение качества литых деталей из высокопрочных алюминиевых сплавов путем использования процедур моделирования при разработке и оптимизации литейной технологии. Для достижения поставленной цели разработаны или уточнены модели основных литейных процессов и

создана система компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) для широкого класса алюминиевых сплавов и способов литья, обеспеченная свойствами группы высокопрочных алюминиевых сплавов.

Научная новизна работы заключается в разработке более сложных и адекватных представлений об особенностях моделируемых процессов на базе проведенных экспериментальных и численных исследований, формулировке соответствующих физических моделей, модификации численных алгоритмов в соответствии с особенностями физических постановок, а также в экспериментальном определении физических параметров используемых сплавов. В частности:

- экспериментально исследован процесс формирования поверхности затвердевающей отливки, соприкасающейся с формой и сформулирована модель теплопередачи между отливкой и формой, предполагающая одновременное существование пятен плотного контакта, газового зазора и межконтактных прослоек, учитывающая кондукционную, конвекционную и лучистую теплопередачу;

- в численные алгоритмы метода конечных элементов (МКЭ) введен способ более адекватного учета быстро изменяющихся температур сопряженных поверхностей отливки и формы путем вычисления прогнозируемых изменений температур с помощью трехслойной временной схемы;

- экспериментально определены параметры граничной теплопередачи и их зависимость от прикладываемого давления для группы высокопрочных алюминиевых сплавов в условиях литья в кокиль, ВПФ, ЛНД, ЛКД;

- разработан (и зарегистрирован) способ исследования кинетики затвердевания в условиях ЛКД;

- для учета сложного характера выделения скрытой теплоты в интервале затвердевания сформулирована модель в виде спектра тепловыделения, а в численные алгоритмы МКЭ введен энтальпийный метод учета, позволяющий задавать любые спектры тепловыделения – с наличием локальных тепловыделений как в интервале температур, так и при постоянных температурах;

- экспериментально определены теплофизические параметры для группы высокопрочных алюминиевых сплавов – интервал затвердевания в

неравновесных условиях, скрытая теплота затвердевания, спектр выделения скрытой теплоты, теплоемкость при высоких температурах;

- сформулированы модели образования усадочных дефектов по двум принципиально разным, но одновременно и совместно действующим механизмам – механизму образования микропористости при недостатке давления и механизму формирования макропористости (и раковин) при недостатке питания с учетом сложного изменения структурированности затвердевающего металла;

- численно реализованы в рамках МКЭ взаимовлияющие алгоритмы образования микропористости с расчетом полей давлений по всему объему отливки при фильтрационных процессах в затвердевающей отливке и макропористости с учетом кинетики движения зеркал расплава в каждой возникающей изолированной зоне питания;

- экспериментально определены усадочно-фильтрационные параметры для группы высокопрочных алюминиевых сплавов – коэффициент объемной фазовой усадки и коэффициент пропорциональности для зависимости коэффициента фильтрации от доли жидкой фазы.

Практическая значимость работы состоит в разработке СКМ ЛП "Полигон", которая была неоднократно и успешно применена при отработке литейных технологий на ряд отливок общего и специального назначения и получила широкое распространение на различных литейных производствах России и СНГ. Помимо этого, система «Полигон» успешно используется на некоторых литейных и металлургических кафедрах ВУЗов России в целях обучения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Физико-математическая модель теплопередачи между отливкой и формой (экспериментально исследованная и математически сформулированная) предполагающая одновременное существование равномерно распределенных пятен относительного плотного контакта и теплопередачи через газовый зазор.
2. Физико-математические модели образования усадочных дефектов по двум одновременно и совместно действующим механизмам – механизму образования микропористости и механизму образования макропористости;
3. Экспериментальное определение теплофизических и усадочно-фильтрационных параметров группы высокопрочных алюминиевых сплавов, а

также параметров граничной теплопередачи для ряда специальных способов литья.

4. Реализация уточненных моделей и алгоритмов в рамках МКЭ и разработка системы компьютерного моделирования литейных процессов для широкого класса сплавов и способов литья.

Публикации. По теме диссертации имеется 42 публикации (в т.ч. авторское свидетельство), СКМ ЛП «Полигон» зарегистрирована РОСПАТЕНТом в реестре программ для ЭВМ, представленные материалы неоднократно обсуждались на российских и международных конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, литературного обзора, шести глав, выводов и списка литературы. Материалы работы изложены на 149 страницах машинописного текста, содержат 12 таблиц и 45 рисунков. Список литературы содержит 119 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность темы работы, сформулирована ее цель, представлена научная новизна, практическая значимость и основные положения выносимые на защиту.

В литературном обзоре приведен анализ имеющихся представлений об основных особенностях и физических моделях, которые необходимо учитывать при моделировании тепловых и усадочных процессов в отливке по данным литературы. Кроме того, рассмотрены основные численные методы и современные СКМ ЛП, использованные при моделировании литейных процессов. Сделаны выводы о главных особенностях тепловых и усадочных моделях, которые необходимо учитывать в литейных постановках, а также вывод о предпочтительности использования МКЭ при численных расчетах большинства литейных процессов.

Первая глава посвящена тепловым процессам в затвердевающей отливке, учету тепловыделения в интервале затвердевания и экспериментальному определению теплофизических параметров высокопрочных алюминиевых сплавов. Одним из основных вопросов моделирования литейных процессов является решение задачи охлаждения и затвердевания отливки произвольной конфигурации. Численные методы позволяют решить эту задачу на основе уравнения нестационарной теплопроводности с соответствующими граничными условиями:

$$\begin{aligned}
& K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q_v = C_v \frac{\partial T}{\partial t}, \\
& T = T(S, t), \\
& K_n (\partial T / \partial n) = -q_n, \\
& K_n (\partial T / \partial n) = -\alpha (T - T_{air}),
\end{aligned} \tag{1}$$

где x, y, z - координаты в области пространства, ограниченного поверхностью S ; n - нормаль к поверхности S ; t - время; T - функция температурного распределения в пространстве координат x, y, z, t ; K_x, K_y, K_z, K_n - теплопроводность в направлении осей x, y, z и нормали n соответственно; q_v - объемная мощность внутренних источников теплоты; C_v - объемная теплоемкость; q_n - граничный тепловой поток (по нормали к S); α - коэффициент граничной конвективной теплопередачи в среду с температурой T_{air} .

При решении задачи затвердевания, наибольшее значение имеет то, насколько адекватно организован учет выделения скрытой теплоты и теплопередачи через границу сопряжения отливки и формы. Особенности теплопередачи через границу рассмотрены в главах 2 и 3.

Показано, что для алюминиевых сплавов в широком интервале скоростей охлаждения зависимость количества выделившейся твердой фазы (и относительной теплоты) от температуры можно считать свойством сплава. Для улучшения адекватности расчетов реальных многокомпонентных промышленных сплавов ее следует определять экспериментально. Рациональным методом учета этой зависимости является применение кусочно-непрерывных зависимостей на некотором количестве подинтервалов с линейной интерполяцией внутри интервала:

$$\begin{aligned}
& i = 1 \dots n; \\
& P_s(i) = P_s(1), P_s(2), \dots, P_s(n); \quad P_s(1) = 0; P_s(1) \leq P_s(i+1); P_s(n) = 1; \\
& T(i) = T(1), T(2), \dots, T(n); \quad T(1) = T_{liq}; T(i) \geq T(i+1); T(n) = T_{sol}; \\
& T(P_s) = \frac{P_s - P_s(i)}{P_s(i+1) - P_s(i)} * [T(i+1) - T(i)] + T(i) \quad \text{при} \quad P_s(i) < P_s < P_s(i+1); \\
& Q(P_s) = L * P_s,
\end{aligned} \tag{2}$$

где i - номер точки в спектре выделения твердой фазы; $P_s(i)$; n - общее количество точек в спектре; $T(i)$ - доля твердой фазы и температура соответственно в точке i (спектр выделения твердой фазы); T_{liq} , T_{sol} - температуры ликвидуса и солидуса соответственно; $Q(P_s)$ - количество выделившейся теплоты при доле твердого P_s ; L - скрытая теплота затвердевания.

Для группы высокопрочных алюминиевых сплавов экспериментально определены теплофизические свойства, необходимые для расчетов, представленные в табл. 1. Заливались цилиндрические пробы различных диаметров и снимались термические кривые в центре слитков, которые обрабатывались и пересчитывались как зависимость изменения теплосодержания от температуры. В диссертации приведены все параметры и условия проведенных экспериментов, а также все температурные графики.

Табл.1.

Теплофизические свойства высокопрочных алюминиевых сплавов

Сплав	Тлик	Тсол	Ср		Lp	Спектр Ps(i) для n=6
	град. С		кДж/(кг*К)		кДж/кг	% при равномерн. рас- полож. Т(i)
			Т≈Тсол	Т=20 С		
АЛ24С	635	565	1.10	0.83	250	0,40,60,80,90,100
АЛ24П	633	570	1.10	0.83	250	0,40,60,80,90,100
ВАЛ10	642	532	1.20	0.90	330	0,30,60,80,90,100
АМХ605	640	540	1.20	0.80	340	0,20,40,60,80,100
АЛ9М	610	570	1.20	0.90	380	0,35,45,55,65,100
АЛ23-1	630	480	1.20	0.90	260	0,30,60,90,98,100

Вторая глава посвящена исследованию физических процессов на границе между отливкой и формой. Там же сформулирована физическая модель граничной теплопередачи, позволяющая адекватно учесть сложный характер теплопередачи между отливкой и формой. Численными расчетами показано, что даже небольшие участки плотного контакта существенно влияют на тепловые процессы в затвердевающей отливке (см. рис. 1, 2). Экспериментально показано, что в реальности на границе сопряжения на всех стадиях охлаждения и затвердевания одновременно существуют как пятна плотного контакта, так и области с воздушным зазором (см. рис. 3).

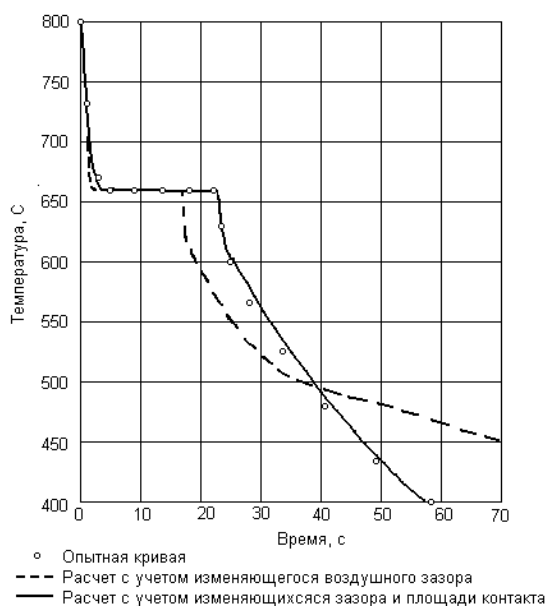


Рис.1. Температурные кривые (слиток Ø45мм А97 в стальной форме) при разных моделях граничной теплопередачи

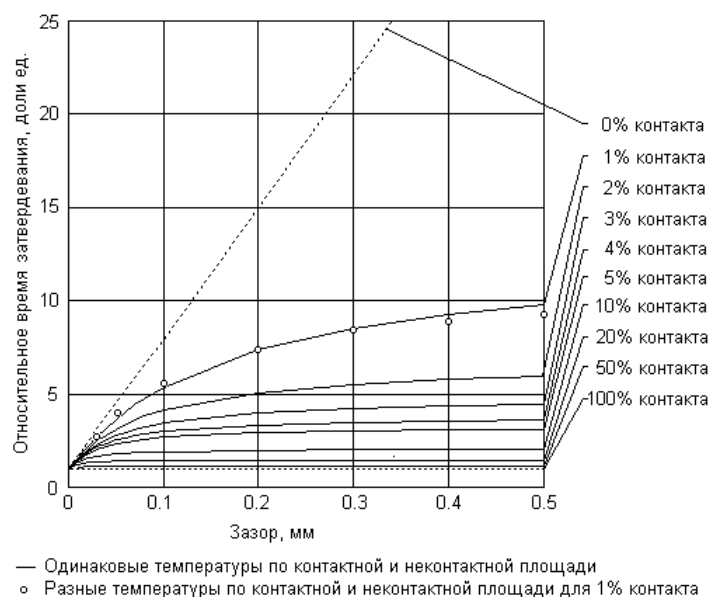


Рис.2. Номограмма зависимости времени затвердевания от площади контакта и толщины зазора

Проводились заливки цилиндрических слитков различных диаметров из легкоплавких сплавов в тонкостенные формы из огнеупорного стекла и в процессе затвердевания через бинокулярный микроскоп фотографировали (рис.3) формирующуюся поверхность сопряжения, а кроме того снимали температурные кривые на поверхности и в центре слитков. Опыты проводились для свинца и сплава Вуда.

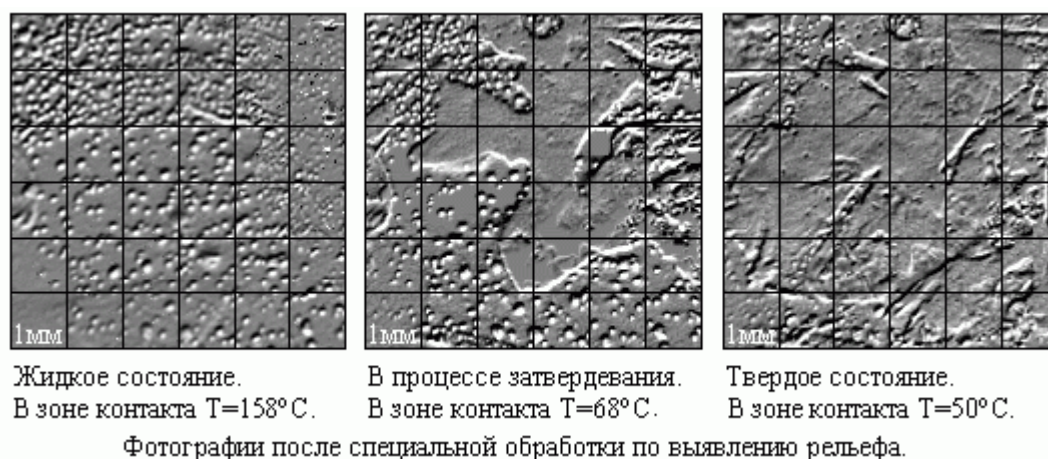


Рис.3. Формирование поверхности сопряжения отливки с формой в процессе затвердевания для слитков Ø42мм из сплава Вуда ($T_{\text{кр}}=68^{\circ}\text{C}$).

Затем методом численного моделирования полученные данные распространили на заливку свинца в металлические формы и на заливку алюминия в металлическую форму. В диссертации приведены все исходные и обработанные фотогра-

фии, условия проведенных экспериментов, опытные и расчетные температурные графики.

При исследовании возможной взаимосвязи площади плотного контакта и усредненной величины зазора показано, что она определяется типом рельефов соприкасающихся поверхностей. График такой зависимости для регулярного пилообразного рельефа является некоторой усредненной линией, получающейся при суммировании графиков для других видов регулярных рельефов, как профильного, так и мозаичного типа. В связи с этим для зависимости усредненного зазора от относительной площади контакта для некоторого рельефа состоящего из рельефов разных видов можно использовать следующую формулу.

$$Dg=(1-Sk)*H_{\max}/2, \quad (3)$$

где Dg - толщина среднего по неконтактной площади зазора; Sk - относительная площадь контакта; $H_{\max}$ – максимальный перепад высот рельефа, являющийся собственно параметром некоторого эффективного рельефа, описывающего контактирующие поверхности.

Краткие выводы по результатам работ, описанным во второй главе таковы. В жидком состоянии площадь плотного контакта составляет около 70%, по остальной площади средняя величина зазора не менее 0.05 мм. Даже в случае простых цилиндрических отливок в период затвердевания и до полного охлаждения присутствуют равномерно распределенные пятна плотного контакта с площадью 3-5%. Величина зазора меняется от 0.05 мм (условно) в жидком состоянии до некоторой величины, зависящей от объемной усадки при затвердевании, линейных размеров и коэффициента термического расширения (усадки). В среднем за время затвердевания она составляет около 0.2 мм. При определении площади контакта и величины зазора можно пользоваться различными зависимостями, связывающими площадь контакта и зазор через параметры некоторого реального (для формы) или эффективного (суммарного для отливки и формы) рельефа профильного или мозаичного типа.

Сформулирована модель теплопередачи через границу «отливка-форма», позволяющая учесть исследованный сложный характер теплопередачи. Выведено следующее уравнение для коэффициента теплопередачи β , характеризующего теплопередачу между сопрягаемыми поверхностями.

$$\beta = \frac{1}{\frac{1}{Sk \cdot a_k + Sg \frac{Kg}{Dg} + Sr \cdot \varepsilon \cdot Co \frac{T_c^4 - T_m^4}{T_c - T_m}} + \frac{Dp}{Kp}}, \quad (4)$$

$$Sk, ak, Sg, Dg, Dp, Sr, \varepsilon, = F(Ps, T, P, \dots),$$

где Sk, Sg, Sr - относительные площади контакта, зазора и лучистой теплопередачи соответственно (в обычном случае $Sr=Sg$); a_k - коэффициент теплопередачи в зоне контакта; Kg, Kp - теплопроводности зазора и межконтактной прослойки (краски или окисной пленки) соответственно; Dg, Dp - толщина зазора и межконтактной прослойки соответственно; $\varepsilon = F(\varepsilon_c, \varepsilon_m)$ - эквивалентная суммарная степень черноты сопряженных поверхностей отливки и формы, зависящая от степени черноты отливки ε_c и степени черноты формы ε_m ; Co - постоянная Больцмана; T_c - температура сопрягаемой поверхности отливки; T_m - температура сопрягаемой поверхности формы или температура среды для случая теплопередачи в среду; $F(Ps, T, P, \dots)$ - функция зависимости параметров граничной теплопередачи от доли твердой фазы Ps , температуры T , давления P или других технологических параметров.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию параметров граничной теплопередачи в отливках из высокопрочных алюминиевых сплавов. При этом заливались цилиндрические и плоские слитки из различных сплавов при различных способах литья и снимались термические кривые в центре и на краю слитков. Затем результаты экспериментов обрабатывались аналитически и методами моделирования для получения параметров граничной теплопередачи. Для кокильного литья данные обработки экспериментов приведены в табл. 2. Результаты экспериментов показали, что несмотря на разную интенсивность теплопередачи в окрашенном и неокрашенном кокиле, площадь плотного контакта во всех случаях примерно одинакова, а понижение суммарного коэффициента теплопередачи в окрашенном кокиле определяется только дополнительным тепловым сопротивлением слоя краски.

Для условий литья сплава АЛ9М на медные вакуумированные холодильники в условиях ВПФ получены следующие данные. При остаточном отрицательном давлении 0.12 МПа: $Sk=0.44$ (44%), $Dg=0.07$ мм. Для невакуумированного холодильника: $Sk = 0.01$ (1%), $Dg = 0.14$ мм.

Площадь плотного контакта на границе при литье в кокиль

Сплав	Окрашенный кокиль	Неокрашенный кокиль
	Площадь плотного контакта S_k (при зазоре $D_g=0.2$ мм)	
	доли единицы	
АЛ24С	0.058	0.058
АЛ24П	0.055	0.058
АЛ9М	0.058	0.045
АЛ23-1	0.044	0.052
Среднее	0.054	0.053

Для условий литья при ЛНД сплава АЛ24С на рис. 4 показана экспериментально определенная зависимость площади контакта от величины прокладываемого давления. Опыты для ЛНД проводились для давлений $P=0.02$ МПа и $P=0.08$ МПа при разных скоростях заполнения. Скорости заполнения составляли $V=5$ и $V=10$ по лимбу машины ЛНД для обоих уровней давления. Для условий ЛКД (жидкая штамповка) аналогичная усредненная зависимость для бинарных сплавов системы Al-Si, Al-Mg и для сплава АЛ24П показана на рис. 5. В ЛКД использовались давления 65 МПа, 130 МПа, 185 МПа, 320 МПа. При исследовании на сплаве АЛ24П использовался специально разработанный способ определения кинетики затвердевания в условиях ЛКД, на который было получено авторское свидетельство.

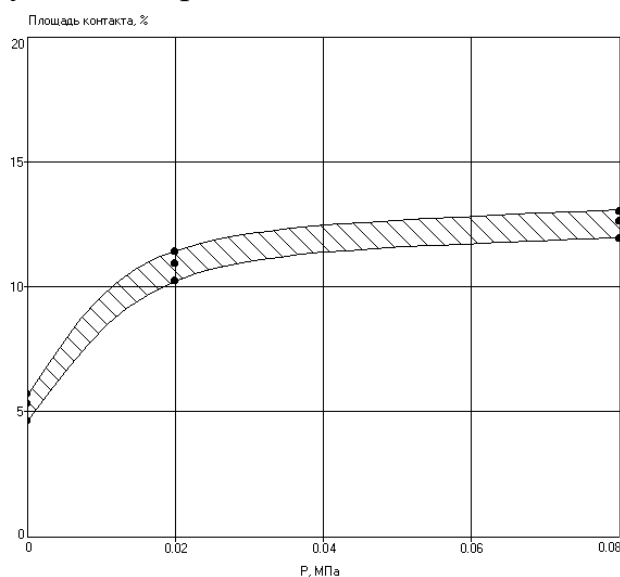


Рис. 4. Влияние величины давления на площадь контакта при ЛНД.

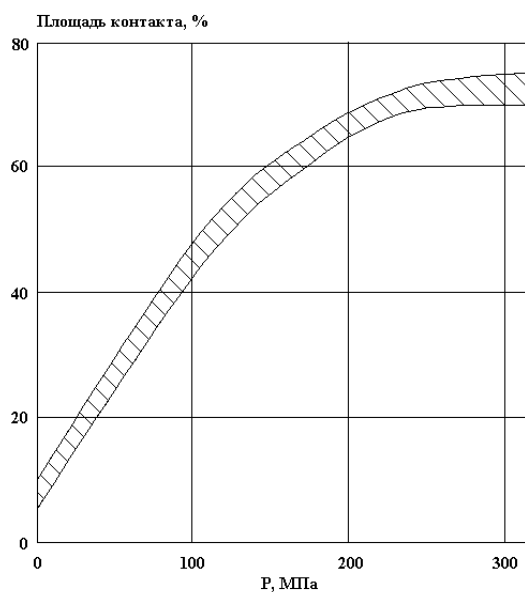


Рис. 5. Влияние величины давления на площадь контакта при ЛКД.

В диссертационной работе приведены все параметры и условия проведенных экспериментов, а также все опытные и расчетные температурные графики.

Четвертая глава посвящена используемому в работе численному методу – методу конечных элементов (МКЭ), а также особенностям ввода в численные алгоритмы описанных в других главах физических моделей. МКЭ является наиболее современным численным методом решения основных уравнений, описывающих базовые литейные процессы, в т. ч. тепловую и фильтрационную задачу. В рамках МКЭ физическая область задачи делится на конечные элементы и непрерывное распределение интерполируется кусочно-непрерывными функциями на каждом конечном элементе. Подстановка этих интерполяций в уравнения вида (1) или эквивалентные им при вариационном подходе дает систему уравнений, решение которой позволяет получить приближенное решение задачи. В конечном итоге разрешающую систему уравнений можно представить в следующем виде:

$$(w*[K] + [C]/\Delta t)*\{\Delta T\} = -[K]*\{T1\} - \{F\} . \quad (5)$$

где $[K]$ - матрица жесткости (теплопроводности); $[C]$ - матрица демпфирования (теплоемкости); $\{F\}$ - вектор-столбец нагрузки (тепловой нагрузки); $\{T1\}$ - вектор-столбец исходного распределения температур; Δt – шаг по времени; $\{\Delta T\}$ - вектор-столбец искомой функции изменения температуры за шаг; w - весовой коэффициент, изменяющийся от 0 до 1 и характеризующий применяемую разностную временную схему – явную, неявную и т.д.

Эта формулировка позволяет несколько эффективнее экономить машинные ресурсы, чем если бы решать уравнения не относительно вектора изменения $\{\Delta T\}$, а относительно вектора температуры $\{T2\}$ в конце временного шага.

Ввод теплопередачи между отливкой и формой в численное решение через условия конвективной теплопередачи в среду, которые входят в вектор нагрузки $\{F\}$, позволяет учесть быстрые изменения поверхностной температуры. При реализации этого подхода отливка и форма дискретизируются отдельными сетками с совпадающими границами сопряженных элементов отливки и формы. Каждая из этих сеток считается независимой расчетной областью. Взаимосвязь между ними решается в рамках конвективных граничных условий с эффективным коэффициентом теплопередачи β и известными температурами узлов противоположной поверхности в начале шага по времени. Недостатком граничного условия теплопередачи в среду является отсутствие учета измене-

ния температуры противоположной поверхности. Для возможности учета изменения за временной шаг температуры противоположной поверхности можно задействовать трехслойную схему по времени, когда запоминаются температуры трех временных слоев одновременно. В этом случае появляется возможность использовать модель для прогноза изменения температур узлов противоположной поверхности:

$$\begin{aligned} T_N &= T_{m1} + 0.8 * (T_{m1} - T_{m0}); \\ T_S &= 0.5 * (T_{c1} + T_{m1}); \\ T_{m2} &= \begin{cases} 0.5 * (T_{m1} + T_N) & \text{при } (T_N < T_S \cup T_{m1} < T_{c1}) \text{ или } (T_N > T_S \cup T_{m1} > T_{c1}); \\ 0.5 * (T_{m1} + T_S) & \text{при } (T_N > T_S \cup T_{m1} < T_{c1}) \text{ или } (T_N < T_S \cup T_{m1} > T_{c1}), \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

где T_{m2} - прогнозируемая средняя за текущий временной шаг температура узла формы; T_{m1} - температура узла формы в начале текущего шага; T_{m0} - температура узла формы в начале предыдущего шага; T_{c1} - температура узла отливки в начале текущего временного шага; T_S - прогнозируемая эффективная температура к которой стремятся оба граничных (совпадающих) узла сопрягаемых поверхностей; T_N - прогнозируемая температура узла формы в конце текущего шага.

Для ввода в расчетные алгоритмы скрытой теплоты затвердевания с учетом того, что спектр тепловыделения может содержать площадки, рациональнее всего использовать энтальпийный метод. К наиболее устойчивым и скоростным модификациям этого метода можно отнести метод эффективного подъема температур в соответствии с энтальпией. При этом методе решение проходит в два этапа. На первом этапе рассчитываются энтальпия для каждого узла без учета тепловыделения. Это дает возможность определить новое значение доли твердой фазы. На втором этапе по рассчитанным изменениям доли твердого вычисляются новые температуры с учетом тепловыделения.

Полагая для простоты теплоемкость сплава C_p постоянной на некотором температурном интервале ΔT , можно записать:

$$\Delta H = C_p * \Delta T - L * \Delta P_s, \quad (7)$$

где ΔH - изменение энтальпии при изменении температуры ΔT и соответствующем изменении доли твердой фазы ΔP_s .

Учитывая (7) для полностью твердого и полностью жидкого состояния при некоторых допущениях разрешающее уравнение (5) можно записать относительно энтальпии:

$$(w * [K] + [C] / \Delta t) * \{\Delta H\} = -[K] * \{H_1\} - \{F * C_p\}, \quad (8)$$

где H_1 - энтальпия в начале текущего шага по времени.

Учитывая уравнения связи температуры и доли твердой фазы (2) можно определить кусочно-непрерывную зависимость доли твердого от энтальпии: $P_s = F(H)$. Тогда изменение температуры с учетом тепловыделения при затвердевании определится следующим образом:

$$\Delta T = (\Delta H + L \cdot (F(H_1 + \Delta H) - P_{s1})) / C_p, \quad (9)$$

где H_1, P_{s1} - известные значения энтальпии и доли твердого в начале текущего шага по времени.

Зависимость типа $P_s = F(H)$ можно использовать еще на стадии формирования разрешающего уравнения относительно энтальпии (8). Это позволяет увеличить устойчивость результатов к увеличению временного шага, однако и в этом случае операция (9) необходима, т.к. позволяет точно перевести изменение теплосодержания в температуру. Анализ уравнений (8) и (9) показывает, что скрытая теплота будет полностью учтена даже в том случае, если интервал затвердевания окажется внутри температурного (энтальпийного) приращения ΔT (ΔH). Этот метод позволяет одинаково эффективно учитывать и широко-интервальные тепловыделения и тепловыделения при постоянных температурах. Кроме того, т.к. собственно решение и формирование локальных матриц не усложнены дополнительными вычислениями, это не ухудшает устойчивость задачи, и позволяет экономить общее время счета.

Пятая глава посвящена усадочно-фильтрационным процессам в затвердевающей отливке. Для алюминиевых сплавов образование пористости в первую очередь зависит от процесса объемной усадки в каждой точке отливки. Коэффициент усадки может быть различен для разных фаз, выделяющихся при затвердевании, например, для α -твердого раствора и эвтектики. Для учета этого можно использовать функцию $K_u(P_s)$ зависимости коэффициента реализации полной усадки K_u от доли твердой фазы P_s . На практике эту функцию удобно задавать в виде спектра реализации усадки. Тогда относительную объемную усадку V_u (в долях единицы) можно выразить:

$$\begin{aligned} V_u &= \beta \cdot K_u(P_s) \cdot P_s + \alpha \cdot (T_o - T); \\ T &= T_{liq} \text{ при } T < T_{liq}; \quad T_o = T_{liq} \text{ при } T_o < T_{liq}; \\ K_u(P_s) &= [(K_{ui+1} - K_{ui}) / (P_{si+1} - P_{si})] \cdot [P_s - P_{si}] + K_{ui} \text{ при } P_{si} \leq P_s \leq P_{si+1}; \\ K_{ui} &= K_{u1}, K_{u2} \dots K_{un}; \quad K_{u1} = 0; \quad K_{u1} \leq K_{u(i+1)}; \quad K_{un} = 1; \\ P_{si} &= P_{s1}, P_{s2} \dots P_{sn}; \quad P_{s1} = 0; \quad P_{si} \geq P_{si+1}; \quad P_{sn} = 1, \end{aligned} \quad (10)$$

где β – коэффициент суммарной объемной усадки при затвердевании; α – коэффициент объемной термической усадки в жидком состоянии; T_o и T – температура в начальный и текущий моменты времени, соответственно; T_{liq} – температура ликвидуса; i , n – номер точки и количество точек в спектре усадки, соответственно; K_{ii} , Ps_i – коэффициент реализации усадки и доля твердой фазы в точке i , соответственно.

При моделировании питания отливки необходимо учитывать как минимум два различных механизма образования усадочных дефектов. По первому механизму образуются макропористость и раковины, по второму – микропористость. Эти виды пористости разделены не по величине пористости, а по механизму образования, который, в свою очередь, и определяет предельный уровень пористости.

Макропористость образуется при недостатке питания (отсутствии необходимого объема металла для компенсации усадки) выше зеркала расплава или его условного эквивалента в двухфазной зоне. Поскольку объединение условного зеркала в двухфазной зоне и реального зеркала жидкой зоны геометрически может представлять из себя единую поверхность, в дальнейшем это объединение будем называть «зеркалом». Для расчета макропористости необходимо решать задачу возникновения и движения зеркал расплава. Перемещение зеркал обусловлено объемной усадкой, а возникновение новых зеркал происходит из-за формирования при затвердевании изолированных друг от друга объемов, а также из-за возникающей изоляции от внешней «подпитки», что характерно для специальных способов литья типа ЛНД. В зависимости от доли жидкого металла и «структурированности» той области, которая находится выше зеркала, пористость образуется либо по принципу «вытекания» жидкого металла, либо по принципу усадки при полном отсутствии компенсации. При этом «структурированность» двухфазной зоны, т.е. принцип образования в ней пористости определится интервалами между некоторыми характерными величинами доли жидкой фазы, являющимися в определенной мере свойствами сплава (рис. 6). С точки зрения образования пористости имеет смысл выделить следующие критические точки – долю жидкого при схватывании дендритного каркаса Pl_n , долю жидкого при прекращении гравитационного течения Pl_g и долю жидкого при полном перекрытии междендритных каналов Pl_o .

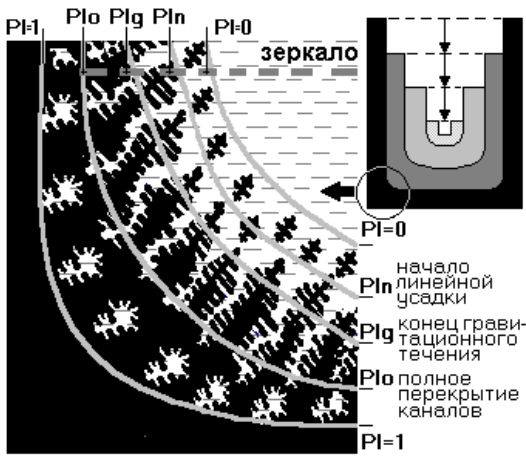


Рис.6. Схема образования макропористости.

Следует подчеркнуть, что эти критические точки хотя и имеют определенный физический смысл, отраженный в названии, но больше являются некоторыми эффективными величинами, регламентирующими смену модели поведения расплава в двухфазной зоне.

В тех областях, где происходит образование макропористости при доле жидкого выше Pl_n , пористость равна 100%, то есть образует раковину. При доле жидкого выше Pl_g макропористость велика и равна доле жидкого. Ниже Pl_g макропористость относительно мала и определяется объемной усадкой оставшейся жидкой части. Кроме того, эти величины серьезно влияют на кинетику продвижения зеркала расплава, т.к. от них зависит площадь зеркала в той или иной области двухфазной зоны, а значит и скорость падения зеркала. Важно также то, что эти критические точки являются существенно неконсервативными характеристиками, поэтому при моделировании литейных технологий их необходимо варьировать, чтобы получить полный набор появляющихся в реальности зон с макропористостью.

Микропористость образуется при недостатке давления ниже зеркала (то есть в области потенциально достаточного питания). Давление в глубине зоны с формально хорошими условиями питания падает из-за суммарной объемной усадки, фильтрационного (затрудненного) характера движения жидкой части металла в двухфазной зоне, изоляции от внешнего давления при формировании твердой фазы на границах приложения давления, где внешнее давление — атмосферное для обычных способов литья и повышенное или пониженное — для специальных. Наиболее адекватное описание распределения давления, дает решение дифференциального уравнения фильтрационного течения. Проводя некоторую модификацию для литейной постановки, уравнение стационарного фильтрационного течения можно записать следующим образом:

$$K_x \cdot \partial^2 H / \partial x^2 + K_y \cdot \partial^2 H / \partial y^2 + K_z \cdot \partial^2 H / \partial z^2 + qv = 0, \\ H = H(S) \text{ при } Pl > Pl_0, \quad (11)$$

где x, y, z – координаты в пространстве, ограниченном поверхностью S ; H – распределение пьезометрического напора в пространстве координат x, y, z ; K_x, K_y, K_z – проницаемость в направлении осей x, y, z , соответственно; qv – внутренний объемный сток за счет усадки; $H(S)$ – задаваемый (чаще всего атмосферный) пьезометрический напор на поверхности тела S .

Так же как и тепловое уравнение (1), уравнение (10) лучше всего решать с помощью МКЭ. С учетом (11), давление p в каждом узле конечно-элементной сетки можно вычислить следующим образом:

$$\begin{aligned} p &= (H + Y_{mir} - Y) \cdot \rho \cdot g \text{ при } Y \leq Y_{mir}; \\ p &= 0 \text{ при } Y = Y_{mir}; \\ Y_{mir} &= 0,5 \cdot (Y_1 + Y_2), \end{aligned} \quad (12)$$

где ρ – плотность расплава; g – ускорение свободного падения; Y – высота точки, где определяется p ; Y_{mir} – средняя высота зеркала за шаг в зоне, где находится точка.

При падении давления ниже некоторого критического значения p_0 возникают условия для появления поверхности раздела и формирования «зародыша» микропоры, который далее будет расти в соответствии с объемной усадкой. Очевидно, что окончательный объем микропоры будет равен объемной усадке оставшейся жидкой части. Значение такой пористости не может быть больше значения суммарной объемной усадки. Под критическим давлением p_0 можно подразумевать разные величины. С одной стороны, можно считать, что это парциальное давление растворенных газов. Тогда, при падении давления ниже p_0 газ выделяется в виде газового пузырька, что соответствует, например, водородной пористости в Al-сплавах. С другой стороны, можно принять, что критическое давление – это эффективная прочность жидкого расплава на разрыв, тогда образование пористости формально не связано с газовыделением, и вопрос о том, что в порах – вакуум или газ, остается открытым. Таким образом, описанная модель образования микропористости фактически универсальна, и ее можно успешно использовать при разных представлениях о потенциальных причинах формирования микропористости.

По мере затвердевания внешнее давление постепенно отключается (если на поверхности $Pl < Pl_0$). Проницаемость можно выразить через коэффициент фильтрации K_f и кинематическую вязкость ν следующим образом: $K_x = K_y = K_z = K_f / \nu$. Коэффициент фильтрации K_f зависит от доли жидкой фазы.

Рядом авторов установлено, что эта зависимость может быть выражена через коэффициент пропорциональности K_o и некоторую степень n как $K_f = K_o \cdot (Pl/P_s)^n$. Коэффициент K_o является свойством сплава и определяется экспериментально, при этом обычно степень $n=2$.

В общем случае задачи по микро- и макропористости следует решать совместно, так как они могут влиять друг на друга. Например, перемещение зеркала расплава, вычисляемое в задаче по макропористости, влияет на распределение давления. В свою очередь, распределение давления, являющееся решением усадочно-фильтрационной задачи для микропористости, определяет изолированность зон питания и образование новых зеркал. Кроме того, очевидно, что процесс образования раковин может влиять на тепловую задачу. Хотя во многих случаях возможны достаточно адекватные решения и без учета этого влияния, однако на современном уровне развития моделирования совместное решение тепловой и усадочной задач с учетом их взаимного влияния можно считать обязательным условием достоверности расчетов.

Для адекватного моделирования величину объемной усадки β и коэффициент пропорциональности K_o необходимо определять экспериментально. В связи с этим, были проведены соответствующие опыты для группы высокопрочных алюминиевых сплавов. Объемную усадку определяли по известной пробе Татюра. Для определения коэффициента пропорциональности проводили заливку вертикального цилиндрического слитка на медный холодильник с теплоизолированной боковой поверхностью слитка, чтобы обеспечить направленное затвердевание. Для контроля направленности затвердевания снимали температурные кривые в центре слитка на разной высоте и около его боковой поверхности. Затем проводили разрезку центральной части слитка и методом гидро-взвешивания находили зависимость плотности(пористости) от расстояния до холодильника. Далее методом численного моделирования подбирали по опытной кривой соответствующие коэффициенты пропорциональности. Данные по экспериментальному определению усадочно-фильтрационных характеристик сплавов приведены в табл. 3.

Табл.3.

Усадочно-фильтрационные характеристики высокопрочных алюминие-
вых сплавов

Сплав	$\beta, \%$	$K_o \cdot 10^{-13}, \text{м}^2$ (при $n=2$ для $K_f=K_o \cdot (Pl/P_s)^n$)	$Pl_n; Pl_g; Pl_o$
АЛ 23-1	4,5	2	0,5; 0,3; 0,1
АЛ 24П	4,8	5	— " —
АЛ 24С	5,2	5	— " —
АЛ 9М	3,8	4	0,7; 0,15; 0,1
АМХ 605	5,7	7	0,5; 0,3; 0,1
ВАЛ 10	5,9	5	0,7; 0,15; 0,1

В диссертационной работе приведены все параметры и условия проведенных экспериментов, а также опытные и расчетные графики.

Шестая глава посвящена применению системы компьютерного моделирования литейных процессов в условиях реального производства. На основе моделей и численных алгоритмов сформулированных и описанных в предыдущих главах была разработана и программно реализована для платформы персональных компьютеров система компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) «Полигон», которая позволяет в трехмерном виде моделировать совместно протекающие тепловые и усадочные процессы при затвердевании с учетом их взаимного влияния. Кроме того, в настоящее время в «Полигоне» можно моделировать гидродинамические и тепловые процессы при заливке. СКМ ЛП «Полигон» зарегистрирована в реестре программ для ЭВМ и РОСПАТЕНТом выдано свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ No 2001610195 на «Систему автоматизированного моделирования литейных процессов «Полигон»» с первенством от 1997 г. В различное время на СКМ ЛП «Полигон» в СНГ было приобретено более 50 лицензий. Некоторые из них: ФГУП Сатурн, Москва; ОАО АвтоВАЗ, Тольятти; НПО Салют, Рыбинск; АО Красный двигатель, Новороссийск; АО УАЗ, Ульяновск; ФГУП Воткинские заводы, Воткинск; АО Звезда, Санкт-Петербург; АО Тракторный завод, Чебоксары; АО РУСТ-95, Санкт-Петербург; АО НПФ Металлоресурс, Санкт-Петербург; АО Авиационное Производственное Объединение, Комсомольск-на-Амуре; JSC Aerospace castintg, Южная Корея, Тэджон; АО Ижорские Заводы, Санкт-Петербург; АО Пензтяжпромарматура, Пенза; АО Бобруйский машиностроительный завод, Бобруйск; АО Русские самоцветы, Санкт-Петербург; АО Икар, Курган; АО Завод турбинных лопаток, Санкт-Петербург; АО КАМАЗ,

Набережные Челны; АО Казанское моторостроительное производственное объединение, Казань; АО Автрамат, Харьков; АО Нижегородский машиностроительный завод, Нижний Новгород; НПП Машпроект, Николаев; ГП Обуховские заводы, Санкт-Петербург.

Кроме того, СКМ «Полигон» используется на литейных и металлургических кафедрах различных высших учебных заведений. Вот некоторые из них: Санкт-Петербургский институт машиностроения; Тульский государственный технический университет; Самарский государственный технический университет; Тольяттинский политехнический институт; Комсомольский-на-Амуре технический университет; Пермский государственный университет; Белорусский национальный технический университет; Московский государственный технический университет им. Баумана; Северо-западный государственный заочный технический университет; Нижнетагильский технологический университет.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Экспериментально установлено, что процессы граничной теплопередачи между отливкой и формой связаны с одновременным существованием как равномерно распределенных пятен плотного контакта, так и газового зазора в течение всего времени затвердевания фасонных отливок.

2. С помощью численного моделирования доказано, что для металлических форм даже небольшие относительные площади плотного контакта от 1% до 5%, характерные для литья в кокиль, существенно влияют на тепловые процессы, уменьшая время затвердевания как минимум в полтора раза.

3. С помощью численного моделирования доказано, что при относительных площадях плотного контакта более 10%, что характерно для ЛПД, ЛНД, ЛКД и т.п., влияние теплопередачи через газовый зазор несущественно по сравнению с теплопередачей через области плотного контакта.

4. Сформулирована модель граничной теплопередачи, предполагающая одновременное существование пятен плотного контакта, газового зазора и межконтактных прослоек, учитывающая кондукционную, конвекционную и лучистую теплопередачу.

5. Применение прогнозирования граничных температур и трехслойной временной схемы при численных расчетах на основе МКЭ позволило

уменьшить влияние величины шага по времени на адекватность расчетов и более адекватно учесть наличие больших перепадов температур между отливкой и формой в начальные моменты времени.

6. На основе проведенных экспериментов и обработки экспериментальных данных с помощью численного моделирования установлены параметры граничной теплопередачи и их зависимость от давления для литья в кокиль, ВПФ, ЛНД, ЛКД.

7. Сформулирована модель учета выделения скрытой теплоты и применен энтальпийный метод ее ввода в вычислительные алгоритмы на базе МКЭ, что позволяет адекватно моделировать процессы затвердевания как в период затвердевания в интервале температур при формировании твердого раствора, так и при тепловыделениях при постоянных температурах при затвердевании эвтектики.

8. Для группы высокопрочных алюминиевых сплавов экспериментально определены теплофизические параметры необходимые для моделирования тепловых процессов в отливках из этих сплавов.

9. Сформулированы модели формирования усадочных дефектов по совместно действующим механизмам образования микропористости и макропористости, которые позволяют адекватно учесть как влияние фильтрационных процессов и падение давления, так и кинетику движения зеркал расплава во всех формирующихся зонах изолированного питания.

10. Показано, что для адекватного моделирования образования микропористости необходимо численное решение дифференциального уравнения фильтрационного течения в трехмерной постановке и расчет полей давлений в объеме отливки с учетом зависимости коэффициента фильтрации от доли жидкой фазы.

11. Установлено, что для адекватного моделирования образования макропористости и раковин необходимо численными методами определять все формирующиеся изолированные зоны питания с учетом наследования, рассчитывать для каждой зоны кинетику движения зеркала расплава.

12. Показано, что в двухфазной зоне механизм формирования макропористости связан с разной степенью структурированности двухфазной зоны, которая может быть определена, с точки зрения образования пористости, тремя критическими точками – доля жидкого при схватывании дендритного

каркаса, доля жидкого при прекращении гравитационного течения, доля жидкого при полном перекрытии каналов.

13. Показано, что такие усадочные характеристики сплавов, как критические точки, являются неконсервативными параметрами, что отражается на статистическом характере формирования макропористости и при моделировании литейных технологий их необходимо варьировать, чтобы получить полный набор появляющихся в реальности зон с макропористостью.

14. Для группы высокопрочных алюминиевых сплавов экспериментально определены усадочно-фильтрационные параметры необходимые для моделирования процессов формирования усадочных дефектов в отливках из этих сплавов.

15. Разработана система компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) «Полигон», которая в настоящее время широко распространена на литейных производствах СНГ (около 50 предприятий) и используется для моделирования литейных процессов для самого широкого спектра сплавов и способов литья. Кроме того, данная система широко используется в учебных целях на литейных и металлургических кафедрах ВУЗов СНГ.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Численный анализ и оптимизация при автоматизированном проектировании технологии на примере отливок колесного типа / М.М.Фролов, В.М.Голод, М.Д.Тихомиров // Ускорение НТП в литейном производстве на основе механизации и автоматизации: Материалы семинара. МДНТП - М., 1988.- С.82-88.
2. А.С. Способ определения скорости затвердевания металла при литье с кристаллизацией под давлением / Абрамов А.А., Зайцев Е.В., Батышев А.И., Тихомиров М.Д., Любавин А.С., Беспалько В.И. – № 1537367 СССР от 15.09.89.
3. Тихомиров М.Д. Определение давления в расплаве при литье с кристаллизацией под давлением// М.: Литейное производство. – 1990.- № 5 -С.18-19.
4. Тихомиров М.Д. Теплопередача через границу "отливка-форма" при затвердевании алюминиевых сплавов.// М.: Литейное производство. - 1990.- № 6- С.18-19.
5. Опыт изготовления металлооптических элементов по ВПФ с применением холодильников/ Квочко С.М., Тихомиров М.Д., Кулагин В.А., Дорохов С.А. // Вопросы оборонной техники: Сб. Материаловедение. Металлургическое и заготовительное производство. Серия 16. ЦНИИ Информации - М., 1990.- Вып. 5 (179)- С.42-45.
6. Системы автоматизированного проектирования технологических процессов литья./ Тихомиров М.Д., Абрамов А.А., Аникин С.М.// Обзор № 5240: ЦНИИ Информации. - М., 1990.- С.64.

7. Тихомиров М.Д., Сабиров Д.Х., Абрамов А.А. Пакет прикладных программ "Полигон" для моделирования процессов литья алюминиевых сплавов // Литейное производство. - 1991.- № 10- С.6-7.
8. Интегрированная САПР литейной технологии. Структура, функции, перспективы./ Ишханов А.Е., Фролов М.М., Пулит В.В., Тихомиров М.Д.// Литейное производство. - 1991.- №10-С.23-24.
9. САПР технологических процессов литья в СССР и за рубежом (обзор)/ Тихомиров М.Д.// Автоматизация проектирования и управления качеством отливок: Материалы IV научно-технической конференции. - Санкт-Петербург, ЛДНТП- 1991.- С.66-71.
10. Тихомиров М.Д., Сабиров Д.Х. Численное моделирование образования горячих трещин в отливках из алюминиевых сплавов// М.: Литейное производство. - 1992- № 6-С.32-33.
11. Тихомиров М.Д., Голод В.М., Морозов Б.М. Моделирование технологических процессов литья // М. Литейное производство. – 1992.- № 10-11- С.48-50.
12. Тихомиров М.Д., Некрасов В.К., Петриков А.В. Принципы поэтапного развертывания САПР ТПЛ // М. Литейное производство. - 1992- № 12- С.22-23.
13. Очередная версия и перспективы развития ППП "Полигон"/ Тихомиров М.Д., Сабиров Д.Х., Абрамов А.А., Голод В.М. // Кристаллизация и компьютерные модели: Тезисы V Международной научно-технической конференции. - Ижевск, 1992.- С.101-102.
14. Численный анализ теплообмена в системе отливка-форма при наличии зазора / Тихомиров М.Д., Голод В.М. // Кристаллизация и компьютерные модели: Тезисы V Международной научно-технической конференции. - Ижевск, 1992. - С.61-63.
15. Тихомиров М.Д., Абрамов А.А., Кузнецов В.П. Современный уровень теории литейных процессов.// Литейное производство. - 1993. -№ 9.- С.3-5.
16. Тихомиров М.Д. Система автоматизированного моделирования литейных процессов. - М.: Литейное производство. - 1993, No 9, с.32-35.
17. Компьютерное моделирование процессов затвердевания, образования раковин, пор и кристаллизационных трещин как средство получения высококачественных отливок./ Тихомиров М.Д., Сабиров Д.Х., Абрамов А.А.// Материалы в экстремальных условиях: Тезисы IV европейской конференции "Восток-Запад" по материалам и процессам, семинар Д. - Санкт-Петербург, 1993.- С.33
18. Голод В.М., Ишханов А.Е., Тихомиров М.Д., Сабиров Д.Х., Фролов М.М., Морозов Б.М., Сивко В.И., Бех Н.И. Интегрированная САПР литейной технологии "POLYCAST". - М.: Литейное производство. - 1994, No 10-11, с.44-47.
19. Принципы создания и развертывания двухуровневой интегрированной САПР литейной технологии/ Голод В.М., Тихомиров М.Д., Сабиров Д.Х., Ишханов А.Е., Фролов М.М., Сивко В.И., Морозов Б.М.// Кристаллизация: компьютерные модели, эксперимент, технологии: Тезисы VI Международной научно-технической конференции. - Ижевск, 1994.- С.135-137.
20. Тихомиров М.Д., Сабиров Д.Х., Голод В.М. Модели и оценка систем моделирования литейных процессов// Литейное производство. – 1995.- № 4-5- С.68.

21. Системный анализ процесса формирования отливки (прикладные аспекты)/ Голод В.М., Тихомиров М.Д., Сабиров Д.Х.// Литейные материалы, технология, оборудование: Сборник трудов ЦНИИМ . - Санкт-Петербург, 1995.- Вып. I - С.26-30.
22. Проект "Карат": от моделирования процессов литья до литейных моделей/ Кузнецов В.П., Абрамов А.А., Тихомиров М.Д., Сабиров Д.Х., Кузин Л.А. // Литейное производство. – 1995.- № 4-5- С.69-70.
23. Модели литейных процессов в САМ ЛП "Полигон"/ Тихомиров М.Д.// Литейные материалы, технология, оборудование: Сборник трудов ЦНИИМ. - Санкт-Петербург, 1995.- Вып. I- С.21-26.
24. Тихомиров М.Д., Голод В.М. Современная САПР литейной технологии // Литейное производство. - 1996.- № 10- С.29-30.
25. Сравнение тепловых задач в системах моделирования литейных процессов "Полигон" и ProCast/ Тихомиров М.Д.// Компьютерное моделирование литейных процессов : Сборник трудов ЦНИИМ. - Санкт-Петербург, 1996.- Вып. 2 - С.22-38.
26. Кузнецов В.П., Абрамов А.А., Тихомиров М.Д., Сабиров Д.Х. Компьютеризация и автоматизация процесса проектирования отливок и изготовления оснастки //- Литейное производство. - 1997. - №4 - С.45-47.
27. Тихомиров М.Д. Основы моделирования литейных процессов. Тепловая задача// Литейное производство. - 1998.- № 4- С.30-34.
28. Основные аспекты решения тепловой задачи при моделировании литейных процессов/ Тихомиров М.Д. // Компьютерное моделирование литейных процессов: Сборник трудов ЦНИИМ. - Санкт-Петербург, 1998.- Вып. 3- С.30-57.
29. Назначение, возможности и перспективы развития САМ ЛП "Полигон"/ Тихомиров М.Д.// Литейное производство сегодня и завтра: Тезисы всероссийского научно-практического семинара .ЛенАЛ. - Санкт-Петербург, 2000. - С.54-56.
30. Теплоотвод при расчете на ЭВМ затвердевания алюминиевых сплавов в металлической форме/ Тихомиров М.Д. // Современные технологические процессы и оборудование для литья в металлические формы: Тезисы докладов семинара. Часть 2. ЦНИИ информации. - М., 1989. - С.52-53.
31. Автоматизированное моделирование литейных процессов/ Тихомиров М.Д., Десницкая Л.В.Суханова В.П., Емельянов В.О. // Учебное пособие.- СПб., СЗПИ, 2000 – С.80.
32. Тихомиров М.Д., Сабиров Д.Х., Агроскин А.Р. Моделирование – достижения и проблемы. Игра для взрослых «Полигон»// Литейное производство.- 2001.- № 6 - С.33-35.
33. Высокоэффективная технология литья крупногабаритных лопаток ГТД / Калюкин Ю.Н., Мальцева Ю.Ю., Тихомиров М.Д., Сабиров Д.Х.// Литейное производство.- 2001.- № 11- С.7-9.
34. Тихомиров М.Д. Основы моделирования литейных процессов. Усадочная задача.- М.: Приложение к журналу Литейное производство.- 2001, No 12, с.8-14.

35. Тихомиров М.Д., Комаров И.А. Основы моделирования литейных процессов. Что лучше – метод конечных элементов или метод конечных разностей?// Литейное производство.- 2002.- № 5- С.22-28.
36. Физико-математические основы компьютерного моделирования литейных процессов/ Тихомиров М.Д. // Литейное производство сегодня и завтра: Материалы 3-й Всероссийской научно-практической конференции .- СПб., 2002- С.135-138.
37. Физико-математические основы компьютерного моделирования литейных процессов. Система моделирования «Полигон»/ Тихомиров М.Д., Сабиров Д.Х., Абрамов А.А.// Юбилейный выпуск: Сб. ЦНИИ Материалов – СПб., 2002. - С.151-176
38. Тихомиров М.Д. Основы моделирования литейных процессов. Системы синтеза литейной технологии и их отличие от систем моделирования литейных процессов// Литейное производство.- 2004.- № 2- С.28-31.
39. Тихомиров М.Д. Основы моделирования литейных процессов. Важные особенности систем моделирования// Литейное производство.- 2004.- № 5- С.24-30.
40. Сравнительный обзор наиболее известных систем компьютерного моделирования литейных процессов/ Тихомиров М.Д.// Новые подходы к подготовке производства в современной литейной промышленности: Материалы научно-практического семинара. - СПб., 2004.- С.14-28.
41. Система компьютерного моделирования литейных процессов «Полигон»/ Тихомиров М.Д., Бройтман О.А.// Новые подходы к подготовке производства в современной литейной промышленности: Материалы научно-практического семинара. - СПб., 2004.- С.29-36.
42. Обоснование выбора литейной моделирующей системы/ Тихомиров М.Д., Ермакова С.В.// Новые подходы к подготовке производства в современной литейной промышленности: Материалы научно-практического семинара. - СПб., 2004- С.37-41.