

На правах рукописи

КОЙНОВ Игорь Львович

Разработка и внедрение метода проектирования систем
питания отливок из высокопрочных алюминиевых сплавов
для изделий авиационной техники.

Специальность 05.16.04 - Литейное производство

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва - 1999

Работа выполнена в Московском государственном техническом
университете им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель:

заслуженный деятель науки и техники
РСФСР, доктор технических наук,
профессор Баландин Г.Ф.

Научный консультант: кандидат технических наук Поляков С.Н.

Официальные оппоненты: Д.Т.Н., профессор Либров И.А.

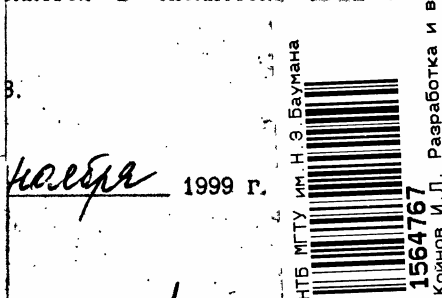
К.Т.Н., доцент Болдин А.Н.

Ведущее предприятие: ОАО "Аэроэлектрик"

Защита диссертации состоится "15" декабря 1999 г. на
заседании диссертационного Совета К0 53.15.13 в Московском госу-
дарственном техническом университете им. Н.Э.Баумана по адресу:
107005, г.Москва, Б-5, 2-я Бауманская ул., дом 5.

в одном экземпляре, заверенный пе-
чу адресу.

храниться в библиотеке МГТУ им.



Шубин И.Н.

0 п. л. Заказ №102 Тираж 100 экз.
им. Н.Э.Баумана

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Требования к литым деталям для изделий современной авиационной техники неуклонно возрастают. Появились сплавы, обладающие повышенным уровнем удельной прочности, жаростойкости, коррозионностойкости. Это требует принципиально новых подходов к вопросу проектирования литейной технологии и оснастки.

В настоящее время в России и за рубежом начинают применяться системы моделирования литейных процессов: "Полигон" (ЦИИИМ, г.С.-Петербург), "LVMSolid" (УдГУ, г.Ижевск), "MAGMA" (г.Аахен, Германия) и другие, что выводит литейную технологию на новый уровень развития. Однако существует ряд ограничений на их использование. Все системы построены на расчетах вариантов технологии, которые должен задавать проектировщик, то есть качество отливки находится в зависимости от субъективных факторов. Другим ограничением является отсутствие исчерпывающей информации, насколько можно доверять результатам моделирования, какие исходные данные закладываются в систему, и как реализуется математическая модель.

1564764
Согласно классификации О.М.Алифанова, разработку любой математической модели можно разделить на два этапа: 1) структурную идентификацию, заключающуюся в определении общей структуры математического описания процессов в виде тех или иных уравнений, и 2) параметрическую идентификацию, которая предполагает насыщение выбранной модели необходимой количественной информацией и определение неизвестных характеристик модели. В настоящее время достаточно детально проработаны вопросы структурной идентификации математических моделей формирования отливки, и гораздо меньше - параметрической идентификации. Для параметрической идентификации модели необходимо уметь решать обратные по отношению к самой модели задачи. Задачи проектирования литейной технологии, смысл которых заключается в реконструировании внешних условий, обеспечивающих получение литой детали заданного качества, - также относятся к классу обратных задач. Такие задачи решаются только математически и методы их решения, как правило, неочевидны.

Для отливок из высокопрочных алюминиевых сплавов частой причиной брака является наличие пористости и рыхлот, потеря герметичности. Дефекты устраняются, когда правильно спроектирована система питания. Во многих случаях цель достигается после неоднократных доработок оснастки. Особенно велики потери времени и средств при внедрении в производство новых кокильных отливок. Тем не менее в авиационном машиностроении наблюдается тенденция перевода отливок

ответственного назначения с традиционного способа литья в песчаные формы на литье в кокиль, под низким давлением и другие спецвиды, обеспечивающие плотность и герметичность литого металла.

Цель работы - разработка метода компьютерного проектирования систем питания и выбора режимов литья в кокиль и песчаные формы деталей из высокопрочных алюминиевых сплавов для повышения их плотности и снижения затрат на доводку оснастки. Отличие от известных подходов заключается в том, что задача проектирования ставится как обратная по отношению к моделированию, а это требует присутствия в модели уравнений, в которых изменяемыми переменными являются показатели качества отливки (допустимый уровень пористости, протяженность зоны плотного металла), а искомыми переменными являются параметры конфигурации системы питания.

В основу нового метода проектирования предлагается положить математическую модель питания отливки. Модель должна быть полностью - структурно и параметрически идентифицирована. Для этого необходимо найти подходы к решению 2-х типов обратных задач:

- коэффициентной задачи, заключающейся в определении параметров, характеризующих процессы питания внутри отливки;
- геометрической задачи, заключающейся в реконструировании геометрии отливки, обеспечивающей оптимальное её питание.

Научная задача - разработка математической модели питания отливок из высокопрочных алюминиевых сплавов, получаемых литьем в кокиль и песчаные формы, для проектирования систем питания и режимов литья с целью обеспечения заданной плотности литого металла.

Методы исследования. Прямая и обратная задачи питания решаются численным и системотехническим методами с использованием результатов экспериментальной оценки газоусадочной пористости в пробных отливках.

Научная новизна. Защищаются следующие научные положения:

1) задачу проектирования систем питания отливок из высокопрочных алюминиевых сплавов можно сформулировать в виде обратной геометрической задачи питания. В соответствующей ей системе уравнений аргументом является максимально допустимый уровень пористости в отливке, а функцией - параметры конфигурации системы питания. Задача может быть решена численным моделированием и системотехническим методом.

2) при расчете пористости отливку целесообразно рассматривать как капиллярно-пористое тело, в котором соотношение между областями сообщающихся и изолированных междендритных промежутков непре-

равно изменяется в ходе затвердевания. Соответствующая краевая задача питания действует в области, граница которой заранее не определена. Допустимо использовать численный алгоритм ее решения методом конечных элементов в области всей отливки. Допустимо использовать модель, в которой процессы питания однозначно определяются только тепловым полем отливки. Неотъемлемой частью модели должен быть метод определения параметров коэффициента фильтрации, сочетающий натурный эксперимент и численное решение обратной коэффициентной задачи питания.

Практическая ценность работы состоит в том, что математическая модель, численный алгоритм ее решения и метод экспериментального определения коэффициента фильтрации реализованы в виде программного комплекса для персональных ЭВМ.

Реализация работы в промышленности. Разработанный в работе программный комплекс передан в литейный цех Киевского авиационного производственного объединения, на Мценский завод алюминиевого литья, в ЦНИИМ (г. Санкт-Петербург), на Воткинский машиностроительный завод. Результаты расчетов использовались для доводки технологии отливки "корпус" из сплава ВAl8, получаемой литьем в кокиль в литейном цехе агрегатного завода "Дзержинец" (г. Москва), а также при освоении нового типоразмера отливки "опора" из сплава ВAl10, получаемой литьем в песчаные формы на заводе "Опыт" (г. Москва).

Экономическая эффективность. Фактический экономический эффект от внедрения на КИАПО составил 46 тыс. рублей (в ценах 1990 года). Эффект получен за счет снижения затрат на доработку кокильной оснастки и сокращения потерь от брака отливок.

Апробация работы. Основное содержание работы, а также ее отдельные положения докладывались и обсуждались:

- на научных семинарах кафедры "Машины и автоматизация литейного производства" МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 1983-1986 гг.);
- на научно-техническом совете литейного отделения НИАТ (Москва, 1990 г.);
- на всесоюзном семинаре "Управление технологическими процессами литья и свойствами отливок" (Москва, 1990 г.);
- на заседании кафедры "Литейные технологии" МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 1999 г.).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано четыре печатных работы.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, изложенных на 225 страницах, содержит 73 рисунков, 4 таблицы и 6 при-

ложений. Список литературы содержит 103 наименования работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлен обзор литературы по вопросам обеспечения питания литых деталей. Основное внимание уделяется мерам, направленным на снижение уровня газоусадочной пористости. Показано, что уровень пористости зависит от большого числа параметров процесса литья. Ввиду одновременного воздействия этих параметров однозначно установить их корреляцию с пористостью нельзя.

При правильной металлургической подготовке расплава наибольшее влияние на пористость оказывают усадочные процессы, которые определяются тепловыми условиями формирования отливки. Газовыделение в возникающие поры играет вторичную роль (см. ур. (3) и (10)).

На характер распределения пористости влияет ширина области двухфазного состояния расплава в отливке, которая зависит от положения сплава на диаграмме состояния и интенсивности затвердевания. Для широкоинтервальных сплавов методы обеспечения питания с помощью прибылей не дают положительного результата. Необходимо применение дополнительных мер (холодильники, утепление и др.). Используя эти меры отдельно друг от друга невозможно гарантировать плотность отливок, но выбор сочетания этих мер неочевиден.

В настоящей работе рассматриваются высокопрочные алюминиевые сплавы - представители 2-х основных групп:

- 1) жаропрочные сплавы на основе алюминий-медь: представитель - ВАЛ10 (широкий интервал кристаллизации 90-100°C);
- 2) герметичные медистые силумины: представитель - ВАЛ8 (узкий интервал кристаллизации 40°C);

Рассмотрены существующие критерии прогнозирования пористости:

- 1) эмпирические, построенные на обобщении опыта литейщиков (правило Геверса и др.);
- 2) представляющие собой такую комбинацию параметров процесса затвердевания, значение которой коррелирует с уровнем пористости в отливке (Д. Раддл, В. М. Голод, Е. Найям и др.).

Более точные методы расчёта пористости должны учитывать особенности физического механизма её возникновения. Исследованиями Г. И. Тимофеева, М. Флемингса установлено, что процесс питания в затвердевающей отливке последовательно проходит стадии жидкостного, суспензионного, а затем фильтрационного питания. С момента образования кристаллического скелета можно говорить о начале процесса фильтрации, полнота протекания которого и определяет уровень пористости в отливке (А. И. Вейник).

Расчет пористости в отливках сложной конфигурации возможен методом математического моделирования процессов питания. Наиболее развиты математические модели формирования отливки, предложенные В. А. Журавлевым, И. Л. Воробьевым. Они позволяют рассчитывать пористость непосредственно, минуя промежуточные критерии. Процесс фильтрационного течения описывается законом Дарси. Модель питания, разработанная в данной работе, включает в себя уравнения теплопереноса и фильтрационного течения расплава, и является частным случаем модели И. Л. Воробьева.

Рассмотрены существующие подходы к автоматизации проектирования систем питания. Работы в этой области немногочисленны и находятся в начальной стадии развития. Анализ этих работ показывает, что предлагаемые методы оптимизации конструкции системы питания имеют недостатки: либо они дают слишком приближенные результаты, либо требуют чрезмерных затрат по времени расчета. В работе Т. Е. Мортланда численный анализ и оптимизация конструкции одной отливки занимает 34.7 CPU часа.

Быстрый и экспериментально проверенный способ проектирования систем питания стальных отливок разработан на кафедре литейного производства МГТУ им. Н. Э. Баумана. Под руководством Г. Ф. Баландина в работах Ю. М. Чикунова, А. С. Чеботарева, С. Н. Полякова, В. А. Попкова развиты основные принципы такого подхода, который назван системотехническим. Поляков С. Н. предложил метод расчета напусков и уклонов для стальных отливок путём приведения фасонной отливки к отливке простой конфигурации эквивалентной по питанию от бесконечной минимальной прибыли. Формулы для расчёта используют коэффициент, которые автор получил экспериментально для ограниченного круга стальных сплавов. Совместное применение системотехнического метода Полякова С. Н. и метода моделирования процессов питания позволяет решить проблему определения этого коэффициента и создать метод проектирования систем питания с качественно новыми возможностями.

Во второй главе представлена математическая модель питания в отливках из высокопрочных алюминиевых сплавов, в постановках для прямой и обратной задач.

Рассмотрим область G_0 , представляющую собой осевое сечение произвольной затвердевающей отливки из широкоинтервального сплава (рис. 1). Экспериментальные исследования процесса фильтрации (А. И. Вейник), позволяют предположить существование в двухфазной зоне поверхности $L_{кр}$, на которой фильтрация прекращается. В области, ограниченной этой поверхностью и зеркалом расплава L_1 в при-

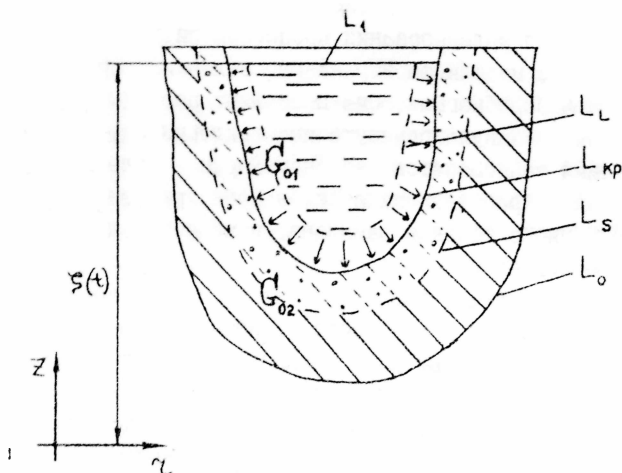


Рис.1. Эскиз области питания G_{01} и области зарождения и роста пор G_{02} .

были, компенсация усадки протекает преимущественно путем фильтрации расплава сквозь сетку растущих кристаллов. Назовем эту область - областью питания G_{01} . В другой части двухфазной зоны G_{02} , ограниченную $L_{кр}$ и поверхностью отливки L_0 , некомпенсированная усадка выражается в зарождении и росте пор. Уровень пористости Π в каждой точке области G_{02} , определяется по формуле

$$\Pi = S_{кр} \cdot \beta / (1 + \beta), \quad (1)$$

где $S_{кр}$ - доля жидкой фазы в точке в момент, когда через нее прошел фронт $L_{кр}$. β - коэффициент объемной усадки, определяемый как

$$\beta = (\rho_{т} - \rho_{ж}) / \rho_{ж}, \quad (2)$$

где $\rho_{т}$, $\rho_{ж}$ - плотности, соответственно, твердой и жидкой фаз сплава.

Величина $S_{кр}$ произвольного микрообъема отливки, а следовательно и его пористость Π , определяется относительным положением фронтов ликвидус L_1 и солидус L_s в момент прохождения через этот микрообъем границы прекращения питания $L_{кр}$, положение которого в двухфазной зоне определяется полем давления в расплаве. Из условия возникновения газоусадочной поры, предложенного В.А. Журавлевым

$$p < p_{г}, \quad (3)$$

(см. стр. 4) предположим, что на поверхности $L_{кр}$ давление равно $p_{г}$ - равновесное давление растворенного в жидком металле газа.

Модель состоит из тепловой и фильтрационной частей. Тепловая часть модели включает в себя уравнения теплового баланса отливки и формы. Фильтрационная часть модели включает в себя:

а) уравнение фильтрационного движения расплава:

$$\vec{W} = K \cdot S \cdot \vec{\nabla} \varphi, \quad \text{где } \varphi = z + p/\rho g, \quad (x, y, z) \in G_{01}, \quad (4)$$

где $\vec{W}$ – скорость фильтрации, K – коэффициент фильтрации, φ – металло-статистический потенциал, p – давление в расплаве, ρ – плотность расплава, z – металло-статистический напор, g – ускорение свободного падения.

б) уравнение неразрывности течения расплава:

$$\vec{\nabla} \vec{W} = \beta \cdot \frac{\partial S}{\partial t}, \quad (x, y, z) \in G_{01}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial t} = - \frac{\beta}{1 + \beta} \cdot \frac{\partial S}{\partial t}, \quad (x, y, z) \in G_{02}, \quad (6)$$

совместно с граничными условиями, описывающими:

в) прекращение фильтрации на фронте $L_{кр}$:

$$\vec{W} = 0, \quad (7)$$

г) опускание зеркала расплава L_1 в прибыли:

$$\frac{d\zeta}{dt} = \beta \cdot \left(\int_{G_{01}} \frac{\partial S}{\partial t} dG \right) / \left(\int_{L_1} S dL \right), \quad (8)$$

где ζ – вертикальная координата зеркала расплава.

д) значение давления на зеркале расплава L_1 в прибыли

$$p = p_0, \quad (9)$$

е) значение давления на фронте прекращения питания $L_{кр}$

$$p = p_r, \quad (10)$$

Начальные условия для уравнений (6)–(8) запишутся в виде:

$$\Pi(x, y, z, t=0) = 0, \quad (11)$$

$$\zeta(t=0) = \zeta_0, \quad (12)$$

В настоящей работе предполагается, что величина коэффициента фильтрации K зависит от доли жидкой фазы и скорости затвердевания:

$$K = \begin{cases} \infty, & \text{при } S_0 < S < 1, \end{cases} \quad (13a)$$

$$K = \begin{cases} K_0 \cdot \left(\frac{S/S_0}{S_0 - S} \right)^n \cdot \left| \frac{dS}{dt} \right|^m, & \text{при } S < S_0, \end{cases} \quad (13b)$$

где K_0, n, m – параметры, учитывающие особенности фильтрации в конкретном сплаве, S_0 – содержание жидкой фазы в сплаве, при котором образуется кристаллический каркас и начинается процесс фильтрации.

Последний множитель в формуле (13б) учитывает влияние ско-

рости охлаждения на интенсивность фильтрации. Физически такое влияние объясняется зависимостью расстояния между вторичными ветвями дендритов от скорости охлаждения расплава. Чем быстрее охлаждение, тем меньше это расстояние, а следовательно, хуже условия питания.

В сформулированной выше математической модели (4)-(13) коэффициент фильтрации K определяет условия питания отливки. Для того, чтобы предложенный подход был достаточно корректным, модель необходимо дополнить методом определения параметров коэффициента фильтрации K_0 , и т. опирающимся на результаты экспериментальных оценок пористости в специально отобранных пробных отливках.

Численный алгоритм модели (4)-(13) разработан с помощью метода конечных элементов. Дифференциальные уравнения процессов затвердевания и питания преобразованы к соответствующим матричным аналогам, в частности, в матричном виде уравнение питания выглядит

$$\begin{cases} P \cdot \{\varphi\} = \beta \cdot C_{01} \cdot \frac{\partial \{S\}}{\partial t} \\ \{\varphi\} \big|_{z=\xi(t)} = \{\varphi_0\} \end{cases}, \quad (14)$$

где P и C_{01} - матрицы фильтрации и объема области питания.

Фильтрационная часть математической модели питания (4)-(13) относится к классу краевых задач Неймана с подвижными границами. Прямое решение полученной системы конечноэлементных уравнений невозможно, так как неизвестны положения границы прекращения питания $L_{кр}$ и зеркала расплава L_1 в прибыли. Чтобы преодолеть эту неразрешимость, был использован метод последовательных приближений. Удалось создать устойчивый алгоритм, который использует матрицы фильтрации P и объема области питания C_{01} , построенные на всей области отливки, а не только на области питания. Это позволяет избежать длительной и трудоемкой процедуры построения и дискретизации области питания на каждом временном шаге.

Уравнения (4)-(13) представляют собой модель питания в постановке прямой задачи. Ниже представлены уравнения, полученные на основе системотехнического метода С.Н.Полякова, которые дополняют модель (4)-(13) и образуют с ней математическую модель проектирования систем питания, сформулированную в виде обратной задачи питания. В ней аргументом является максимально допустимый в отливке уровень пористости, а искомая функция - параметры системы питания: толщина напуска и уклон стенки отливки.

Если в ней части вертикальной пластины толщиной T_0 , затвердевающей в форме с однородными условиями теплоотвода, выделить

участок высотой C_0 с пористостью не превышающей заданной величины Π^* , то этот участок можно считать отливкой, на которую поставлена прибыль той же толщины T_0 . При этом существует такая высота прибыли H_{min} , что при $H < H_{min}$ будет наблюдаться уменьшение зоны плотного металла, а при $H > H_{min}$ зона увеличиваться больше не будет. Такая прибыль называется минимальной бесконечной, а размер плотной зоны отливки характеризует качество литого металла - коэффициент α

$$\alpha = 1 + \frac{T_0}{C_0(\Pi^*)} \quad (15)$$

В методе С. Н. Полякова соответствие между величиной α и пористостью вводилось в виде эталонных шлифов, полученных в натурном эксперименте для ряда сталей. При таком подходе коэффициент α является интегральной оценкой плотности литого металла, усреднённой в пределах сечения отливки, и позволяет проектировать напуски и уклоны, обеспечивающие визуально определяемый уровень пористости не выше, чем в заданном эталоне.

В отличие от метода Полякова С. Н. в данной работе совместно с интегральной характеристикой α используется дифференциальная оценка - максимально допустимая пористость Π^* , которую можно задать в каждой точке отливки. В отличие от α , требования к Π^* в отливках из алюминиевых сплавов регламентированы в отраслевом стандарте, причём Π^* задаётся в привычном числовом виде (коэффициент α представляет собой сравнительную визуальную оценку шлифа). Недостаток дифференциальной характеристики Π^* состоит в том, что на её основе не удаётся построить формулы для проектирования конфигурации фасонной отливки. Этой цели удовлетворяет интегральная характеристика - коэффициент α . Отсюда следует основная идея предлагаемого метода проектирования: 1) формулой (15) устанавливается прямая связь между α и Π^* - коэффициент α теперь определяется расчётом, а не в эксперименте, как раньше; 2) для расчёта конфигурации применяются формулы, полученные системотехническим методом на основе интегральной характеристики α и реализующие обратную по отношению к моделированию задачу питания; 3) спроектированная конфигурация подвергается расчёту пористости путём решения прямой задачи питания, и проверяется соблюдение исходного условия - пористость в каждой точке отливки не должна превышать её дифференциальную характеристику Π^* .

Условие существования бесконечной минимальной прибыли, обеспечивающей качество α для отливки высотой C_1 и толщиной T_1 , запи-

сывается в виде

$$1 + C_1 \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{\alpha}{T^*} \right) = 0 \quad (16)$$

где T^* - толщина отливки, эквивалентной по питанию к исходной. Для определения уклона используется формула:

$$T = T^* + (C - C_1)/(A + A^2), \quad \text{где } A = 1/(\alpha - 1). \quad (17)$$

Для фасонных конфигураций каждый очередной (1+1)-й элемент отливки, начиная с нижнего $i=1$, приводится к эквивалентной по формуле

$$\hat{C}_{i+1} = C_{i+1} + \frac{\hat{C}_i}{1 + \hat{C}_i \cdot (1/T_i - 1/T_{i+1})}; \quad \hat{C}_0 = 0. \quad (18)$$

Соответственно, на каждом этапе приведения рассчитываются напуски и уклоны (см. главу 5), что позволяет получать сложные профили системы питания. Решение обратной задачи питания (4)-(13), (15)-(18) позволяет проектировать системы питания отливок из высокопрочных алюминиевых сплавов с заданной плотностью литого металла.

Модель реализована в виде программного комплекса для персональных компьютеров. Фильтрационная часть комплекса проверена на точность по известным аналитическим решениям. Погрешность - 2-5%.

В третьей главе изложен способ количественного определения параметров коэффициента фильтрации расплава в двухфазной зоне, заключающийся в экспериментальной оценке пористости в пробных отливках и решении обратной коэффициентной задачи питания в них.

Для широкоинтервальных сплавов в качестве пробы использовалась цилиндрическая отливка ($d=70$ мм, $H=130$ мм), затвердевавшая в условиях однонаправленного теплоотвода от нижнего медного холодильника (материал формы - легковесный пеношамот). Процесс затвердевания термометрировался. Для опытов использовался модельный сплав Al-5%Cu (по содержанию меди - аналог ВAl10). Пробы разрезались по перпендикулярным оси плоскостям на 8 образцов (толщиной 15 мм) для гидровзвешивания. Полученные распределения пористости по высоте сравнивались с результатами расчетов с целью определения параметров коэффициента фильтрации K_0 и m из формулы (13).

Поиск параметра m , отражающего влияние скорости охлаждения на процесс фильтрации, составляет внешний цикл расчетов пористости в пробе. Предполагалось, что оптимальное значение m должно находиться в пределах $[-1, 0]$: рассматривались значения $m = -1, 0, -0, 4, -0, 1, 0$. Для каждого из этих значений m определялось на внутреннем цикле расчетов значение K_0 , при котором совпадали расчетные и экспериментальные распределения пористости в пробе:

Al-5%Cu

m	-1.0	-0.4	-0.1	0.
K ₀	$0.3 \cdot 10^{-2}$	$0.1 \cdot 10^{-4}$	$0.5 \cdot 10^{-6}$	$0.2 \cdot 10^{-6}$

Далее для каждой из полученных комбинаций m и K₀ просчитывалось распределение пористости в пробе, затвердевавшей в целиком пеношамотной форме. Тем самым результаты, полученные на пробе, затвердевавшей с высокой скоростью от холодильника, переносились на пробу, затвердевавшую очень медленно. Наилучшее соответствие расчета эксперименту было получено для комбинации параметров m=0., K₀= $0.2 \cdot 10^{-6}$. Таким образом, выявлено незначительное влияние скорости затвердевания на интенсивность фильтрационного питания в отливке из широкоинтервального сплава Al-5%Cu.

Для узкоинтервальных сплавов (представитель - ВAl8) применение изложенной методики не дало аналогичного результата. Пористость практически полностью отсутствовала на 90% высоты пробы. Дифференциация пористости будет заметней, если увеличить протяжённость участка фильтрации. Это возможно при боковом теплоотводе, когда поток расплава будет направлен не вдоль, а поперек первичных осей дендритов.

В песчаной форме отливали по 6 пластин из ВAl8 с переменным углом уклона. Из центральной части клиньев вырезали образцы для определения пористости гидровзвешиванием. Сравнивались экспериментальные и расчетные зависимости пористости образцов от уклона клина. Установлены следующие комбинации параметров m и K₀, удовлетворяющие условиям затвердевания пробы в песчано-глинистой форме:

ВAl8

m	-1.0	-0.4	0.
K ₀	$0.7 \cdot 10^{-3}$	$0.5 \cdot 10^{-5}$	$0.3 \cdot 10^{-6}$

Для каждой комбинации m и K₀ просчитывалось распределение пористости в цилиндрической пробе из ВAl8, затвердевавшей в оболочка из пеношамота на медном холодильнике. Тем самым результаты, полученные на пробе, затвердевавшей с низкой скоростью в песчано-глинистой форме, переносились на пробу, затвердевавшую с более высокой скоростью. Адекватна эксперименту комбинация параметров m=0., K₀= $0.3 \cdot 10^{-6}$, что, как и в случае с Al-5%Cu, свидетельствует о незначительном влиянии скорости затвердевания на интенсивность фильтрационного питания при литье в песчаные и металлические формы.

В четвёртой главе изложены результаты компьютерного исследо-

вания принципов рационального выбора конструктивных и технологических средств обеспечения плотности литых деталей из высокопрочных алюминиевых сплавов ВАЛ8 и ВАЛ10.

Рассматривались следующие конструктивные параметры: соотношение между толщиной и протяженностью стенки отливки, уклон на вертикальной стенке, а также соотношение между размерами питающего (прибыли) и питаемого (вертикальная и горизонтальная стенка) узлов. Из технологических параметров рассматривались: влияние материала и толщины холодильника, теплоизоляции прибыли и отливки, толщины и характера нанесения кокильной краски, внешнего давления. Проведено сравнение этих факторов с точки зрения эффективности управления пористостью. Представлены графики, которые можно использовать для решения простейших обратных задач по выбору конструктивных элементов отливки и некоторых режимов литья.

Для сплава ВАЛ8 построена область технологичности (рис.2), которая для отливок типа пластин описывает границы изменения высоты C_0 и толщины T_0 , при которых существует минимальная бесконечная прибыль толщиной T_n , что используется для преобразования отливки к эквивалентной по питанию и является необходимым условием метода проектирования напусков и уклонов. Для сплава ВАЛ10 такой области построить не удалось. Это значит, что только изменением конструкции системы питания добиться высокой плотности в широкоинтерваль-

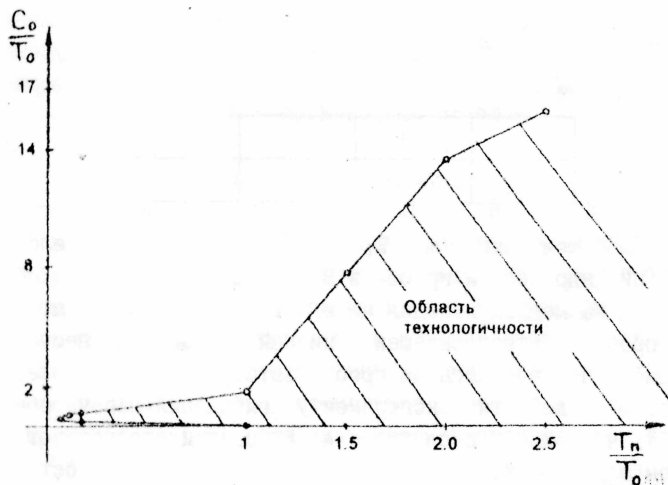


Рис.2. Графическое отображение области технологичности для отливок типа пластин из ВАЛ8 при литье в песчаные формы.

ных сплавах нельзя. Необходимо одновременное применение технологических средств: холодильников, теплоизоляции и т.д.

В пятой главе представлены результаты производственного опробования метода проектирования и результаты внедрения.

Проектирование конструкции системы питания может быть выполнено: 1) для узкоинтервальных сплавов - путем решения обратной задачи питания (4)-(13), (15-18) и поверочного расчёта поля пористости; 2) для широкоинтервальных сплавов (если не удастся построить область технологичности) - путём решения прямой задачи питания для нескольких вариантов, задаваемых проектировщиком, после чего выбирается вариант, обеспечивающий максимальную плотность отливки.

I. В производственных условиях Московского агрегатного завода "Дзержинец" получены положительные результаты по доработке технологии литья в кокиль отливки "корпус" из сплава ВAl8.

Были рассмотрены: базовый вариант, который не смог обеспечить получение годной отливки, и альтернативные варианты, в которых применялись меры по улучшению питания отливки. В частности, один из вариантов отличался от базового тем, что был применен боковой способ подвода металла в форму через щелевой питатель (для устранения обратного температурного градиента), а также тем, что на внешнюю поверхность литой детали нанесены технологический напуск и уклон. Для расчета профиля напуска использовалась модель (4)-(13), (15)-(18) обратной задачи питания, в которой зависимой переменной был максимально допустимый уровень пористости в отливке.

Для расчёта коэффициента α использовались полученные численным и экспериментальным путём распределения пористости в вертикальной пластине толщиной $T_0=15$ мм, затвердевавшей в песчаной форме. Исходя из максимально допустимой пористости $P^*=1.44\%$ определили высоту зоны плотного металла $C_0=42$ мм и $\alpha=1+T_0/C_0=1.357$.

Для исследуемой отливки: $C_1=10$ мм, $T_1=10$ мм, $T_2=5$ мм. Исходное сечение отливки было приведено к эквивалентному по питанию (рис.3а): $T^* = \alpha / (1/T_1 + 1/C_1) = 6.785$ мм. Напуск толщиной $\Delta T = T^* - T_2 = 1.785$ мм наносится на обрабатываемую сторону отливки и начинается на уровне окончания нижней утолщенной части отливки C_1 . Для обеспечения питания стенки по уравнению (17) рассчитывался уклон ϕ на обрабатываемую поверхность верхней части литой детали $A=1/(\alpha-1)=2.857$ и $\text{tg } \phi=1/(A+A^2)=0.0907$. Поверочным расчетом получены зоны пористости 4-го балла по шкале ВИАМ ($>1.44\%$) в сечении отливки (рис.3б) по базовому и изменённому вариантам. Расчёт подтверждает правильность предложенного проектного решения.

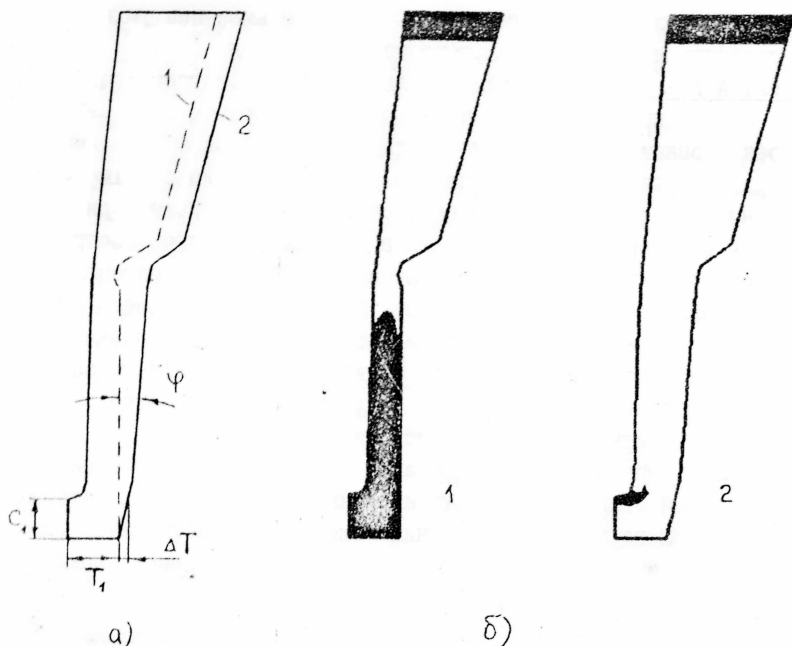


Рис. 3. Результаты расчёта системы питания отливки "корпус" из сплава ВАЛ8 по базовому (1) и спроектированному (2) вариантам: а) эскиз сечения; б) зоны пористости 4-го балла (>1.44%)

II. В производственных условиях завода "Опыт" (г. Москва) была спроектирована система питания нового типоразмера отливки "опора" из сплава ВАЛ10, изготавливаемой литьем в песчаные формы. Проектирование велось методом вариантных расчётов. Результат, подтверждённый рентгеносъёмкой, был получен, когда под центральной и периферийной частями отливки в дополнение к прибылям были установлены холодильники. Первоначальная высота прибыли была уменьшена.

В приложении представлены результаты оценки модели на точность. экспериментальные данные по измерению пористости в пробных отливках, акты внедрения и производственного опробования.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Анализ литературных данных показал, что газоусадочная пористость - характерный дефект отливок из высокопрочных алюминиевых сплавов, влияющий на их служебные свойства. Для анализа этого дефекта целесообразно использовать математическую модель, отра-

жающую взаимосвязь конфигурации отливки и условий ее питания. Существующие модели решают прямые задачи питания. Необходима модель, сформулированная на основе обратной задачи питания, дающая конкретные рекомендации по проектированию системы питания. Неотъемлемой частью модели должен быть метод экспериментального определения фильтрационных свойств высокопрочных алюминиевых сплавов.

2. Разработана математическая модель питания высокопрочных алюминиевых сплавов с учётом фильтрации. В основе модели лежит представление отливки как капиллярно-пористого тела, в котором соотношение между областью питания и областью зарождения и роста пор непрерывно изменяется в процессе затвердевания и может быть определено путем совместного решения дифференциальных уравнений теплового баланса и фильтрационного течения с учетом начальных и граничных условий. Предложена формула коэффициента фильтрации, учитывающая влияние скорости охлаждения. С использованием метода конечных элементов разработана численная модель фильтрационного питания, использующая матрицы, построенные не в области питания, а в области всей отливки; что дает большую экономию компьютерных ресурсов и времени. Разработан программный комплекс для расчёта питания в плоских сечениях отливок.
3. Разработан метод определения параметров коэффициента фильтрации, основанный на совместном вычислительном и натурном экспериментах по количественной оценке уровня усадочной пористости в пробных отливках и решении обратной коэффициентной задачи питания. Для исследования питающей способности сплавов использовались технологические пробы двух типов: направленно затвердевающие для широкоинтервальных и клиновые пробы для узкоинтервальных алюминиевых сплавов. Проверена работоспособность метода и показана его эффективность. Определены фильтрационные характеристики двух представителей алюминиевых высокопрочных сплавов: ВАЛ10 и ВАЛ8. Выявлено незначительное влияние скорости охлаждения на интенсивность фильтрационных процессов в исследованных сплавах. Доказана адекватность модели процессам питания отливок в металлические и песчаные формы.
4. Разработан метод проектирования систем питания отливок из высокопрочных алюминиевых сплавов при литье в кокиль и песчаные формы, заключающийся в решении обратной задачи питания методом моделирования и системотехническим методом С.Н.Полякова. Для этого математическая модель дополнена уравнениями, в которых

аргументом является максимально допустимый уровень пористости, а искомой функцией - конфигурация системы питания: размеры технологических напусков и уклонов. Для узкоинтервальных сплавов (ВАЛ8) обратная задача питания имеет однозначное решение. Возможность решения этой задачи для других сплавов определяется при построении области технологичности.

5. Математическая модель (4)-(13), (15)-(18) может быть использована для выбора рациональных систем питания и режимов литья, при этом учитываются: конфигурация отливки и формы, технологические напуски и уклоны, использование теплоизоляции и холодильников, условия неоднородного теплоотвода, внешнее давления.
6. Метод проектирования систем питания опробован на промышленных отливках "корпус" из сплава ВАЛ8 и "опора" из ВАЛ10. Определены варианты изготовления этих отливок, обеспечивающие повышение их плотности, соответственно, литьем в кокиль и в песчаные формы. Качество полученных отливок подтверждено исследованием их макрошлифов.
7. Метод проектирования и программный комплекс внедрены в производство и получен экономический эффект в размере 46 тыс.руб. (в ценах 1990 года) за счет сокращения затрат на этапе разработки и доводки технологического процесса и конструкции оснастки, а также за счет снижения брака отливок по усадочным дефектам на этапе их освоения.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Койнов И. Л. Метод расчета систем питания фасонных отливок из высокопрочных алюминиевых сплавов. // Авиационная промышленность. - 1990. - №6. - С. 37-38.
2. Койнов И. Л. Исследование условий питания в отливках из высокопрочных сплавов ВАЛ10 и ВАЛ8. // Литейное производство. - 1990. - №10. - С. 16-18.
3. Койнов И. Л. Компьютерное исследование процессов питания в отливках из алюминиевых сплавов при литье в кокиль и песчаные формы. // Кристаллизация и компьютерные модели: Труды IV конференции. - Ижевск: УдГУ, 1990. - С. 115-124.
4. Койнов И. Л. Разработка пакета программ на базе персональных ЭВМ для оценки технологичности по питанию отливок из алюминиевых сплавов при литье в песчаные формы и кокиль // Управление технологическими процессами литья и свойствами отливок: Тезисы докладов межотраслевой конференции. - М.: НИАТ, 1990. - С. 12-14.