

М 420543

МИНИСТАРСТВО ВЫШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ
УЧИЛИЩЕ им. Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи

БАДИКОВ Григорий Александрович

УДК 621.74.043:681.3

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ СПОСОБА РАСЧЕТА НА ЭВМ
ОТКРЫТЫХ ПРИБЫЛЕЙ И РЕЖИМОВ ЛИТЬЯ В КОКИЛЬ
ФАСОННЫХ ОТЛИВОК ИЗ СПЛАВОВ ТИПА СИЛУМИНА

Специальность 05.16.34 - Литейное производство

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Г.Ф.Баландин

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор А.А.Неуструев
к.т.н., доцент Л.Е.Кисиленко

Ведущее предприятие: Балашихинский литейно-механический завод

Защита диссертации состоится "___" _____ 1984 г.
на заседании специализированного Совета К0.53.15.13 в Московском ордена
трудового
Н.Э.Баумана
дом 5.

Ваш от
выслать

С диссертацией
Н.Э.Баумана

Автор

У
специа
д

M420543

Типограф

Подписано к печати

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Постановлениями Коммунистической Партии и Советского правительства предусматривается постоянный рост продукции машиностроения. Основными путями решения этой грандиозной задачи являются быстрый рост производительности труда, повышение эффективности производства, при этом основное внимание должно уделяться качеству выпускаемой продукции, снижению потерь от брака. На современном этапе научно-технической революции невозможно решить эту задачу без широкого использования вычислительной техники. На Пленуме ЦК КПСС 15 июня 1983 года было отмечено о необходимости обеспечения широчайшего применения компьютеров и роботов. Использование вычислительной техники при проектировании технологии литья отливок является скорее исключением, чем правилом. Это обусловлено, с одной стороны, отсутствием необходимого математического обеспечения, а с другой, сложностью процессов литья. Так по литературным данным на качество отливок оказывает влияние порядка 5000 параметров, из которых приблизительно 50 являются контролируемыми. Величина и расположение усадочной раковины и пористости являются одними из важнейших параметров, определяющих качество алюминиевого литья в кокиль. Технологические средства устранения этих дефектов известны. Это - установка прибойлей и холодильников, теплоизоляционных вставок, подбор толщины и состава краски, температуры заливки и температуры кокиля, дифференцированный выбор толщины кокиля. Но надежных расчетных методов количественной оценки эффективности этих средств нет. Технолог вынужден устанавливать эти параметры, полагаясь на собственный опыт и интуицию, что не обеспечивает наиболее экономичного варианта технологии. Это приводит к снижению качества отливок, пониженному коэффициенту использования металла, повышенным затратам на освоение и доводку, снижает выход годного.

Цель работы - повышение обоснованности выбора параметров материалоэкономичной технологии литья отливок, сокращение материальных и временных потерь на освоение и доводку новых технологических процессов, повышение коэффициента использования сил и средств.

Основная научная задача, на основе которой достигается постав-

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1420543

Бадиков Г.А. Разработка и



ленная цель — разработка способа расчета на ЭВМ минимального объема открытых прибылей и режимов литья в кокиль сплавов типа силумина, обеспечивающих получение плотных отливок.

Основной метод исследования — моделирование процессов литья фасонных отливок на ЭВМ и экспериментальное подтверждение результатов моделирования в лабораторных и промышленных условиях.

Научная новизна. В работе получены следующие новые научные результаты и положения:

1. Разработана математическая модель и ее дискретный аналог для расчета образования открытой усадочной раковины и макропористости в фасонных отливках из узкоинтервальных сплавов, затвердевающих с образованием одного термического узла.

2. Разработан способ расчета на ЭВМ открытых прибылей и режимов литья в кокиль сплавов типа силумина, обеспечивающий получение плотных отливок при минимальном объеме прибыли.

3. Процесс образования открытой усадочной раковины и макропористости может быть описан уравнениями теплопроводности и неравности, причем переходная зона делится на две части, в одной из которых усадка компенсируется перемещением жидкой фазы, а в другой образованием пористости.

Практическая ценность работы состоит в том, что разработанный способ расчета минимального объема открытых прибылей и режимов литья в кокиль реализован в виде программы, которую удобно использовать при проектировании.

Реализация работы в промышленности. Результаты работы проверены и приняты к внедрению в цехе алюминиевого литья Рыбинского производственного объединения моторостроения. Программа, разработанная в диссертации, передана в вычислительный центр Жулянского машиностроительного завода.

Экономическая эффективность. Размеры прибылей для отливок типа "фланец" по номенклатуре Рыбинского производственного объединения моторостроения сокращены в 2 — 4 раза, что в пересчете на годовую программу даст экономический эффект 39,4 тысячи рублей за счет сокращения потерь на угар.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и об-

суждались:

— на научных семинарах кафедры "Машины и автоматизация литейного производства" МВТУ им. Н.Э.Баумана в 1979–1982 г.г.

— на седьмой научно-технической конференции, посвященной 112-ой годовщине со дня рождения В.И.Ленина, Калужское областное правление НТО МАШПРОМ, Калуга, 1982 г.

Публикации. По теме диссертации опубликованы две статьи.

Объем работы. Диссертация состоит из пяти разделов, изложенных на 233 страницах, содержит 88 рисунков, 7 таблиц и 2 приложения. Список литературы содержит 101 наименование работ советских и зарубежных авторов.

1. УСАДОЧНЫЕ ДЕФЕКТЫ И ПРОЦЕССЫ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ. СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ РАСЧЕТА ПРИБЫЛЕЙ И РЕЖИМОВ ЛИТЬЯ.

Известно, что основными усадочными дефектами в отливках из узкоинтервальных алюминиевых сплавов являются макropористость и усадочная раковина. Процессы их образования определяются большим числом факторов: начальными температурами в отливке и кокиле, условиями теплоотвода, конфигурациями отливки, прибыли, кокиля; формой, расположением и свойствами теплоизолирующих и захлаживающих вставок. Особенностью литья в кокиль, как показал Вейник А.И. и другие исследователи, является большая неоднородность теплоотвода, как по поверхности отливки, так и во времени. Анализ способов расчета прибылей и режимов литья показал, что, во-первых, ни один из существующих способов не разрабатывался для литья алюминиевых сплавов в кокиль и не применим с этой целью, так как не учитывает неоднородность теплоотвода и многофакторность процесса литья и во-вторых, проектирование прибылей и режимов литья представляет собой итерационный процесс, состоящий в экспериментальном или теоретическом решении задач анализа и синтеза.

Современное состояние моделирования на ЭВМ процессов затвердевания и питания позволяет учесть многофакторность процесса и неоднородность теплоотвода. Такие модели отличаются сложностью и трудоемкостью и применимы только для анализа. Реальный путь использования моделирования для синтеза параметров технологии литья — варианты расчеты.

Исследование математических моделей образования усадочной

раковины и макропористости показывает, что в них, как минимум, должны быть использованы уравнения теплопроводности и неразрывности. В окончательном виде модели представляют собой системы дифференциальных уравнений в частных производных и требуют применения метода конечных элементов, позволяющего учесть произвольную конфигурацию отливки, прибыли и формы, изменяющиеся условия теплообмена.

2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПИТАНИЯ ОТЛИВОК ИЗ УЗКОИНТЕРВАЛЬНЫХ СПЛАВОВ И ЕЕ ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ.

Из работ Вейника А.И., Гуляева Б.Б. известно, что внутри интервала кристаллизации имеется поверхность, на которой скорость фильтрации равна нулю. Предполагается, что этой поверхности соответствует критическое значение доли жидкой фазы - $S_{кр}$. Тогда при значениях доли жидкой фазы (S) больших $S_{кр}$ ($S > S_{кр}$) усадка полностью компенсируется перемещением жидкой фазы, а при $S < S_{кр}$ образуются поры. Перемещение жидкой фазы сопровождается опусканием уровня расплава, т.е. образованием усадочной раковины, причем при определении площади зеркала расплава исключается площадь, занятая твердой фазой. Как показано в работах Бочвара А.А. и сотрудников в узкоинтервальных сплавах невелика интенсивность процессов диффузии и фильтрации, ответственных за образование неоднородностей концентрации примесей и плотности. Поэтому, процесс питания можно описать уравнениями теплопроводности и неразрывности, причем $S_{кр}$ принять постоянным. Неоднородность теплоотвода, свойственная кокилю, учитывается формулировкой сопряженной задачи теплообмена "отливка-кокиль". Для большинства промышленных отливок из алюминиевых сплавов время заливки много меньше времени затвердевания, поэтому считаем, что заполнение формы происходит мгновенно. Начальная температура во всех точках отливки предполагается постоянной. Аналогично для формы. Кроме этого принимаются следующие допущения:

- усадка происходит только в процессе затвердевания;
- характер выделения скрытой теплоты затвердевания задается функцией $S = f(T)$ (где T - температура) на основе правила равновесного рычага или экспериментальной информации;

- рассматриваются только открытые первичные усадочные раковины, образующиеся с верхней поверхности прибыли.

В принятых допущениях разработанная математическая модель имеет вид:

$$c \frac{\partial T}{\partial t} = \vec{\nabla} \lambda \vec{\nabla} T, \quad (x, y, z) \in V, t > 0, \quad (2.1)$$

$$c_{\phi} \frac{\partial T_{\phi}}{\partial t} = \vec{\nabla} \lambda_{\phi} \vec{\nabla} T_{\phi}, \quad (x, y, z) \in V_{\phi}, t > 0, \quad (2.2)$$

$$\left. \begin{aligned} S=0; \quad \xi = \text{const}, \quad \xi < 1 \\ \Pi = 1 - \xi / F_1 \end{aligned} \right\} (x, y, z) \in V_3, \quad (2.3)$$

$$\left. \begin{aligned} \Pi = 0, \quad S > S_{кр}, \quad \xi + S = 1, \\ \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \int_V \frac{\partial S}{\partial t} dV - \frac{d\varepsilon}{dt} \int_{F_0} S dF = 0 \end{aligned} \right\} (x, y, z) \in V_2, \quad (2.4)$$

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq S \leq S_{кр}, \quad \xi + S + \Pi = 1, \\ \varepsilon(S - S_{кр}) + \Pi = 0 \end{aligned} \right\} (x, y, z) \in V_1, \quad (2.5)$$

$$\left. \begin{aligned} T(x, y, z, 0) &= T_{341}, \\ T_{\phi}(x, y, z, 0) &= T_H, \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

$$\left. \begin{aligned} -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} / F_1 &= \alpha (T / F_1 - T_{\phi} / F_1), \\ -\lambda_{\phi} \frac{\partial T_{\phi}}{\partial n} / F_2 &= \alpha (T_{\phi} / F_2 - T / F_1), \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} / F_1 = \alpha_1 (T / F_1 - T_{cp}), \quad (2.8)$$

$$-\lambda_{\phi} \frac{\partial T_{\phi}}{\partial n} / F_2 = \alpha_2 (T_{\phi} / F_2 - T_{cp}), \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} / F_4 = 0, \quad (2.10)$$

$$C = (c_{\kappa} \beta_{\kappa} - c_T \beta_T) S + c_T \beta_T (1 - \Pi) + L \beta_T \frac{dS}{dT}, \quad (2.11)$$

$$\lambda = (\lambda_{ж} - \lambda_{т})S + \lambda_{т}(1 - \Pi), \quad (2.12)$$

где: ρ_i, c_i, λ_i - соответственно плотность, теплоемкость и теплопроводность (индексы: т - твердая фаза; ж - жидкая фаза; ф - форма); L - теплота кристаллизации; ξ, S, Π - соответственно объемное содержание твердой фазы, жидкой фазы и пористость; F - поверхность "отливка-форма"; F_1 - поверхность "отливка-среда"; F_2 - поверхность "форма-среда"; $\alpha, \alpha_1, \alpha_2$ - соответствующие им коэффициенты теплоотвода; F_4 - теплоизолированная поверхность отливки; F_6 - зеркало расплава; ε - коэффициент усадки при затвердевании; $T_{ср}, T_{зал}, T_n$ - температуры среды, заливки и начальная кокиля соответственно; V_1 - область отливки, в которой перемещение жидкой фазы отсутствует и образуется пористость; V_2 - область отливки, в которой жидкая фаза перемещается; V_1 - область усадочной раковины; V_f - область формы; $V = V_1 \cup V_2 \cup V_3$.

Показано, что если рассмотреть уравнение (2.4) в момент окончания затвердевания отливки, то представляется возможность экспериментальной оценки величины $S_{кр}$ для того или иного сплава по формуле

$$S_{кр} = \frac{v_n}{\varepsilon(1 - \varepsilon + v_n)}. \quad (2.13)$$

где: v_n - относительный объем пористости в затвердевшей отливке. Представлены известные зависимости ε и v_n от состава сплава и построенные на их основе с использованием уравнения (2.13) зависимости $S_{кр}$ от состава сплава.

Показано, что математическая модель (2.1)-(2.12) сводится при определенных условиях к уже известным. В частности для сплавов, затвердевающих при постоянной температуре (при стремлении интервала затвердевания к нулю) получаются все математические модели, основанные только на уравнении неразрывности.

Математическая модель (2.1)-(2.12) представляет собой сопряженную краевую задачу нестационарной теплопроводности с дополнительными уравнениями переноса массы (2.4) и (2.5). Дискретный аналог модели и программа для ЕС ЭВМ разработаны для двумерных задач, как в цилиндрических координатах (осесимметричные), так и в декартовых (плоские). Дискретизация модели выполнена методом

конечных элементов. Использовались треугольные элементы и линейная аппроксимация.

Программа была спроектирована, закодирована на алгоритмическом языке "ФОРТРАН-4" и оттестирована. Проектирование осуществлялось с использованием принципов структурного программирования и модульности. Программа проверена на точных решениях задач охлаждения, затвердевания и описания профиля усадочной раковины. Эти задачи могут быть получены путем вырождения математической модели (2.1)-(2.12). Максимальное отклонение численного решения от точного не превышало 6%, а среднее - 2%.

3. ПРОВЕРКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НА АДЕКВАТНОСТЬ.

Без доказательства адекватности математической модели невозможно переносить результаты, полученные при исследовании модели, на реальный объект. Критерием адекватности может служить только практика, эксперимент. Целесообразно использовать для проверки одну из стандартных проб, применяемых в промышленности для оценки склонности сплавов к образованию усадочных раковин и пористости. Эксперименты проводились на пробе в виде усеченного конуса, обращенного вверх большим основанием. Принятые размеры пробы: высота 100 мм, диаметр верхнего основания 70 мм, диаметр нижнего основания 50 мм.

На первом этапе экспериментальная проверка математической модели выполнена с использованием в программе граничных условий I-го рода, которые позволяют однозначно описать изменение температурного поля в отливке. Задание этих условий на основе экспериментальной информации гарантировало соответствие температурных полей в отливке реальному процессу затвердевания. Поэтому проверка модели на адекватность была ограничена только сопоставлением параметров усадочной раковины. В качестве модельного сплава был выбран чистый алюминий марки А99 с целью максимального выявления усадочной раковины. Расплав рафинировался при температуре 700-720°C 0,1% гексахлоретана, выстоялся 10 мин и при температуре 750°C разливался. Алюминий плавился в чугунном тигле в печи сопротивления. Тигель и плавильный инструмент перед плавкой окрашивались краской на основе мел. Температура заливки определялась в ковше с помощью переносной термопары.

Форма из песчано-глинистой смеси готовилась по деревянной модели пробы таким образом чтобы обеспечить осесимметричные условия затвердевания и питания. С этой целью расплав подводился в полость формы снизу по оси конуса через конический питатель наименьшим диаметром 10 мм. Литниковая система располагалась на расстоянии в 3-4 раза превышающем толщину прогрева формы при затвердевании. Верх пробы теплоизолировался листовым асбестом толщиной 3 мм. Четыре термопары равномерно располагались по поверхности пробы: три - на боковой поверхности; одна - на дне у питателя. Материал термопар - ХА, толщина проволоки 0,3 мм, теплоизоляция - фарфоровая оловка и обмзка на основе окиси алюминия, спай обнажен. Показания термопар записывались потенциометром ЭПП-09. Осуществлялся выборочный контроль температуры в центре пробы для определения времени затвердевания отливки. В залитых пробах производился обмер штангенциркулем профиля усадочной раковины, определялась ее максимальная глубина. Измерение объема усадочной раковины выполнялось непосредственно с помощью керосина и мерной бюретки, точность измерения ± 1 мл. В расчетах для чистого металла учет теплоты кристаллизации производился с помощью введения фиктивного достаточно узкого интервала кристаллизации. Сечение пробы было представлено 352 элементами и 207 узлами. Показано, что экспериментальный и расчетный профили усадочной раковины практически совпали, при этом экспериментально определенный объем усадочной раковины соответствовал 18 ± 1 мл, а расчетный - 18,2 мл.

На втором этапе проверка математической модели осуществлялась с использованием в программе граничных условий III-го рода, которые позволили точнее учесть главную особенность литья фасонных отливок в кокиль - существенную неоднородность температур по поверхности отливки. В начале проверялась достоверность описания математической моделью хода затвердевания пробы, для чего использовалась методика выливания слитка. Пробы заливались в чугунный кокиль, который предварительно выдерживался до одного часа в печи с регулируемой температурой, установленной на 200°C , для обеспечения постоянной по всему объему кокиля начальной температуры. Кокиль не доливался чистым алюминием на 3-4 мм и закрывался сверху огнеупорным кирпичем, разогретым до температу-

ры 600–700°С, так как без теплоизоляции зеркало расплава покрывалось корочкой, препятствующей выливанию жидкого остатка. Для стабилизации охлаждения с внешней поверхности кокиля он вместе с кирпичем покрывался воздухонепроницаемым колпаком. Время заливки составляло ~1,5 сек. Отсчет времени начинался сразу же по окончании заливки, за 2 секунды до нужного момента времени колпак и кирпич снимались и незатвердевший сплав в пробе сливался путем резкого опрокидывания. Постоянный начальный объем жидкого сплава в пробе обеспечивался дозированием по весу одноразовой навески шихты. Чистый алюминий плавился в графитовом тигле в печи сопротивления. Проводилось рафинирование гексахлорэтаном, замерялась температура, снималась пленка с поверхности сплава и кокиль заливался прямо из тигля. В работе представлены отливки, полученные выливанием на 12,5; 22,5; 42,5; 62,5 секунд после заливки и отливка, затвердевшая без выливания. Отмечена неоднородность толщины корочки по диаметру полученных отливок, поэтому для сравнения с расчетом использовалась усредненная поверхность фронта затвердевания. Она определялась радиальными замерами на разных уровнях, причем средний размер вычислялся по четырем замерам на двух взаимоперпендикулярных диаметрах отливки. Расчетное положение фронта затвердевания определялось изотермой солидуса. Исходные данные для расчета приняты по литературным источникам: $S_{кр}=0,01$; $\epsilon=0,066$; $L=390$ кДж/кг; $\rho_1=2537$ кг/м³; $C_1=1141,7$ Дж/(кг К); $\lambda_1=170$ Вт/(м К); $\rho_ж=2382$ кг/м³; $C_ж=1047,5$ Дж/(кг К); $\lambda_ж=104$ Вт/(м К); $\rho_ф=7200$ кг/м³; $C_ф=560$ Дж/кг К; $\lambda_ф=42$ Вт/(м К). Отливка разбита на 336 элементов, форма – на 120. В отливке 198 узлов, в форме 93. На графическом изображении "отливка-форма" 30 узлов. Показано, что рассчитанное продвижение фронта затвердевания близко к экспериментальному. Незначительное расхождение в нижней части отливки объясняется по-видимому различиями условий теплоотвода со дна и боковой поверхности кокиля, учет которых в данной программе не предусмотрен, хотя принципиальных трудностей здесь нет. Представлено сопоставление расчетных и экспериментальных профилей усадочных деформаций. С этой целью в кокиль было залито 28 проб, из чистого алюминия, причем температура заливки менялась в пределах 680...800°С, кокиль – 200...300°С. Особенностью кокиля было наличие в верхней части бортика у которого сплав затвердевает в первую очередь,

фиксируя первоначальный уровень сплава в отливке. Постоянство уровня расплава от заливки к заливке обеспечивалось сливом. Перед заливкой кокиль устанавливался по уровню на асбестовую подкладку. Залитый кокиль закрывался асбестом толщиной 3 мм. Профили усадочных раковин были обмерены и результаты измерений статистически обработаны. Расчетный профиль усадочной раковины получен при $T_{\text{зал}} = 720^\circ\text{C}$, $T_{\text{н}} = 200^\circ\text{C}$, а также с учетом теплоотдачи с верхней поверхности отливки. Показано, что расчетный профиль находится в доверительном интервале экспериментального.

Наличие интервала затвердевания влияет на ход затвердевания, а следовательно и на процесс образования усадочной раковины. Поэтому проверка адекватности модели только на чистом алюминии не будет полной. В работе выполнено сопоставление профилей усадочных раковин в пробах из сплава $\text{Al } -0,6\% \text{ Si}$ с интервалом затвердевания в 30°C . Было залито 5 проб по методике экспериментов на выливание, с тем лишь отличием, что верхняя поверхность проб не изолировалась, залитый кокиль не накрывался колпаком и не опрокидывался для выливания. Профиль усадочной раковины каждой из проб замерялся не менее, чем в трех разных направлениях. Результаты статистически обработаны. Функция $S = f(T)$ задавалась для расчета в виде двух зависимостей: линейной и по правилу равновесного рычага.

Исходные данные взяты по литературным источникам: $\epsilon = 0,066$; $S_{\text{кр}} = 0,1$; $T_{\text{л}} = 660^\circ\text{C}$; $T_{\text{с}} = 630^\circ\text{C}$; $T_{\text{зал}} = 660^\circ\text{C}$; $T_{\text{н}} = 200^\circ\text{C}$. Показано, что расчетные профили усадочной раковины для обоих вариантов задания функции $S = f(T)$ находятся в пределах доверительного интервала экспериментального полученного профиля усадочной раковины.

Таким образом, разработанная математическая модель достоверно описывает затвердевание и образование усадочной раковины в отливках, как из чистых металлов, так и из двухкомпонентных сплавов.

4. ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НА КИНЕТИКУ ОБРАЗОВАНИЯ УСАДОЧНОЙ РАКОВИНЫ.

Наличие проверенной математической модели представляет исследователю широкие возможности для изучения процесса. Могут быть

оценены варианты, которые невозможно или нецелесообразно реализовать практически. Другое преимущество численного эксперимента состоит в том, что он позволяет в "чистом виде" выделить влияние того или иного параметра. Это достигается точной выдержкой остальных параметров на постоянном уровне в то время, как интересующий нас параметр меняется заданным образом. Такая ситуация практически недостижима в натурном эксперименте.

В четвертом разделе в качестве модельной отливки была выбрана проба из чистого алюминия, залитая в чугунный кокиль и использованная в третьем разделе для проверки на адекватность. Исследовались главные управляющие параметры технологического процесса литья в кокиль: температура заливки, температура формы, толщина краски на поверхности кокиля, теплоизоляция верхней открытой поверхности отливки. По предварительным экспериментам было установлено, что температура измеряемая в ковше или тигле переносной термопарой до заливки на 30°C выше температуры установившейся в пробе сразу, после заливки. Поэтому такая корректировка вносилась при задании исходных данных. Начальная температура формы задавалась непосредственно. Толщина краски на поверхности кокиля и теплоизоляция верхней открытой поверхности отливки задаются соответственно через коэффициент теплопередачи на поверхности "отливка-кокиль" и коэффициент теплоотдачи на поверхности "отливка-среда". Застабилизировав все параметры технологического процесса на одном уровне и изменяя лишь один из четырех перечисленных, выявлялось его влияние на кинетику образования усадочной раковины, под которой понимается изменение глубины, радиуса и объема усадочной раковины со временем, а также на результирующие характеристики усадочной раковины: профиль, глубину и объем. Конкретные значения для вышеуказанных параметров технологического процесса выбирались из реального диапазона их изменения на практике:

$T_{\text{зал}} = 660 \dots 780^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{н}} = 100 \dots 400^{\circ}\text{C}$; $\alpha = 100 \dots 8000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $\alpha_1 = 0 \dots 400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. В качестве центральной точки, относительно которой варьируется каждый из параметров, приняты $T_{\text{зал}} = 720^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{н}} = 200^{\circ}\text{C}$; $\alpha = 800 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $\alpha_1 = 400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Показано, что кинетика образования усадочной раковины существенно меняется в зависимости от параметров технологического процесса.

Глубина усадочной раковины уменьшается при снижении начальной температуры кокиля, увеличении начальной температуры отливки,

повышении коэффициента теплопередачи на границе "отливка-кокиль", снижении коэффициента теплоотдачи на границе "отливка-среда", причем два последних фактора действуют сильнее. Отмечена нелинейность этих зависимостей.

Анализ результатов численного эксперимента показал, что влияние параметров технологического процесса на кинетику образования и результирующие характеристики усадочной раковины в большой степени определяется конфигурацией отливки и формы, расположением поверхностей контакта "отливка-форма", "отливка-среда", "форма-среда". Поэтому полученные в разделе зависимости верны только для рассмотренной отливки, причем для начальных условий, соответствующих центральной точке. Исследование влияния параметров технологического процесса на кинетику образования усадочной раковины в конкретной фасонной отливке должно проводиться аналогичным путем. Результаты, полученные в данном разделе, доказывают принципиальную возможность определения методом вариадных расчетов минимального объема открытых прибылей и режимов литья в кокиль отливок из узкоинтервальных сплавов, обеспечивающих получение плотных отливок.

5. СПОСОБ РАСЧЕТА НА ЭВМ ОБЪЕМА ОТКРЫТЫХ ПРИБЫЛЕЙ И РЕЖИМОВ ЛИТЬЯ ФАСОННЫХ ОТЛИВОК ИЗ СПЛАВОВ ТИПА СИЛУМИНА И ВНЕДРЕНИЕ ЕГО В ПРОИЗВОДСТВО.

В данном разделе основные научные и технические результаты, полученные в предыдущих разделах, проверены и подтверждены на реальных фасонных отливках серийно изготавливаемых в действующих литейных цехах Рыбинского производственного объединения моторостроения и Жулянского машиностроительного завода.

Доказано, что математическая модель (I)-(I2) и соответствующая ей программа позволяют достоверно описать процесс питания фасонной отливки "Фланец" - представителя групповой технологии. Сопоставление результатов моделирования на ЭВМ серийной технологии литья этой отливки и результатов исследования отливки показало: профиль усадочной раковины практически совпал с расчетным; на макрошлифе прибыль на 80%, считая от основания, свободна

от пористости, что возможно только при направленном затвердевании. В соответствии с требованиями отраслевого стандарта отливка считается плотной, если в ней отсутствует пористость 4 балла.

На примере анализа серийного варианта технологии подробно описана процедура использования программы для моделирования: приведение конфигурации отливки, прибыли и кокиля к конечно-элементной схеме; выбор или расчет исходных данных; обработка результатов расчета.

Суть способа расчета на ЭВМ объема открытых прибылей и режимов литья фасонных отливок из сплавов типа силумина состоит в анализе нескольких вариантов технологии и выбора наилучшего среди них, обеспечивающего получение плотной отливки при минимальном расходе сплава на прибыль. Анализ отдельного варианта технологии осуществляется расчетом по программе, реализующей математическую модель (I)-(I2). Показано, что минимальным объемом обладает такая прибыль фасонной отливки "Фланец", высота которой составляет четвертую часть от высоты прибыли по серийной технологии. Этот результат подтвержден макрошлифами полученных отливок.

Расчеты, приведенные в разделе, позволяют утверждать, что направленное затвердевание к прибыли является существенной особенностью групповой технологии отливок типа "Фланец", не учтенной при проектировании серийной технологии. Этим объясняются завышенные размеры прибылей у отливок этого типа. Разработаны рекомендации по сокращению объема прибылей в 2-4 раза. Рекомендуемые изменения технологии внесены в технологические карты изготовления отливок. Внедрение результатов работы в производство позволило сократить массу заливаемого в кокиль сплава в среднем на 130 г на одну отливку. Это даст возможность только за счет снижения потерь на угар экономический эффект в размере 39,4 тысячи рублей. Программа для анализа технологии питания передана Кулянскому машиностроительному заводу. Внедрение результатов работы позволит повысить качество проектирования технологии питания фасонных отливок и сократить сроки внедрения новых технологических процессов за счет уменьшения количества циклов доводки новых технологий.

ВЫВОДЫ

1. Анализ литературных данных показал, что открытая усадочная раковина и макропористость, определяющие качество по питанию отливок из узкоинтервальных сплавов, при литье в кокиль существенно зависят от многочисленных параметров: начальных температур в отливке и кокиле; условий теплоотвода; конфигурации отливки, прибыли, кокиля; формы, расположения и свойств теплоизолирующих или охлаждающих вставок. Слабо разработаны способы расчета, позволяющие проанализировать эту зависимость. Отсутствуют математические модели питания фасонных отливок из узкоинтервальных сплавов, пригодные для количественных расчетов. Нет способа расчета объема открытых прибылей и режимов литья в кокиль фасонных отливок из алюминиевых сплавов.

2. Разработанная математическая модель образования открытой усадочной раковины и макропористости в фасонных отливках из узкоинтервальных сплавов, затвердевающих с образованием одного термического узла, учитывает в уравнении неразрывности переходную зону и экспериментально определяемую границу, разделяющую переходную зону на две части, в одной из которых усадка компенсируется перемещением расплава, в другой — образованием пористости.

3. Дискретный аналог математической модели образования открытой усадочной раковины и макропористости разработан с использованием метода конечных элементов для осесимметричных отливок или плоских сечений.

4. Программа, написанная на алгоритмическом языке "ФОРТРАН 4" и разработанная с использованием принципов модульности и структурного программирования, позволяет определять для заданного варианта технологии питания кинетику изменения температурных полей в отливке и в форме, кинетику образования усадочной раковины. Проверка программы на точных решениях частных случаев разработанной математической модели показала, что средняя погрешность не превышала 2%, максимальная — 6%.

5. Достоверность математической модели доказана совпадением расчетного профиля усадочной раковины с профилем усадочной раковины, определенным экспериментально в конических пробах из чисто-

го алюминия и двухкомпонентного сплава.

6. Глубина открытой усадочной раковины нелинейно зависит от параметров технологического процесса, причем главным образом определяется неоднородностью теплоотвода по поверхности прибыли заданной конфигурации.

7. Разработанная методика анализа на ЭВМ вариантов технологии питания фасонных отливок позволяет достоверно описывать протекающие в них процессы затвердевания и питания, что подтверждено промышленным опробованием на отливке "фланец". Показано, что методом вариантных расчетов можно определить минимальный объем прибыли и режим литья в кокиль фасонных отливок из сплавов типа силумина.

8. Результаты исследований позволили сократить в 2-4 раза высоту прибылей для отливок типа "фланец" по номенклатуре Рыбинского производственного объединения моторостроения, что в пересчете на годовую программу даст экономический эффект 39,4 тысячи рублей за счет сокращения потерь на угар.

Материалы диссертации опубликованы в статьях:

1. Воробьев И.Л., Бадиков Г.А. Моделирование на ЭВМ процессов питания отливок из узкоинтервальных сплавов - Известия ВУЗов. Машиностроение, 1983, №1, с.108-112.

2. Бадиков Г.А., Воробьев И.Л. Определение размера прибылей путем моделирования питания фасонных отливок из алюминиевых сплавов на ЭВМ. Литейное производство, 1983, №6, с.2-4.

3. Воробьев И.Л., Бадиков Г.А. Повышение эффективности питания отливок прибылями. - В кн.: Тез. докл. Седьмая научно-техн. конф., посвящ. 112-й годовщине со дня рождения В.И. Ленина, Калуга, 1982, с.161.

