

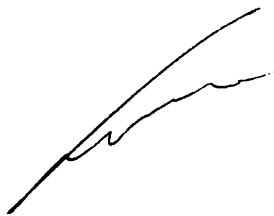
На правах рукописи

Чуркин Алексей Борисович

**Оптимизация процессов формирования
отливок при литье под регулируемым давлением**

Специальность 05.16.04 – Литейное производство

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Екатеринбург 2004

Работа выполнена на кафедре автоматизации и технологии литейных процессов Российского государственного профессионально-педагогического университета.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Е.Л. Фурман,
доктор технических наук, профессор
Б.А. Кулаков,
доктор технических наук, профессор
В.Д. Белов

Ведущая организация ОАО «Уральский научно-исследовательский технологический институт»

Защита диссертации состоится 29 октября 2004 г. в 15 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.285.05 при Уральском государственном техническом университете–УПИ в ауд. I (главный учебный корпус).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УГТУ–УПИ.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 620002, г. Екатеринбург, УГТУ–УПИ, ученому секретарю совета университета, тел. 375–45–74, факс. 343–374–38–84.

Автореферат разослан

2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.212.285.05

С.В.Карелов



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Важными задачами литейного производства на современном этапе, решение которых определяет его конкурентоспособность как технологии заготовительного производства, являются:

- повышение точности заготовок и коэффициента использования металла;
- снижение расхода металла и повышение выхода годного;
- повышение эксплуатационных свойств сплавов в отливках;
- улучшение условий труда и повышение экологической чистоты производства.

Комплексное решение этих задач предполагает разработку, совершенствование и широкое использование прогрессивных методов литья. К числу таких методов относятся методы литья под регулируемым давлением (ЛРД), которые имеют существенные преимущества по сравнению с традиционными методами.

Среди основных преимуществ методов ЛРД можно выделить следующие:

- они позволяют осуществлять не только регулирование общей продолжительности заливки форм, но и целенаправленно управлять характером движения сплава при заполнении отдельных участков полости формы, что должно обеспечивать получение отливок сложных конфигураций без применения технологических напусков;

- нарастающий во времени перепад давлений на расплав существенно увеличивает заполняемость форм, особенно при литье вакуумным всасыванием, что позволяет сократить или полностью исключить технологические напуски и припуски. Это позволяет получать отливки с тонкостенными элементами без механической обработки или с наименьшей ее трудоемкостью;

- подвод металла через металлопровод при соответствующем конструировании и расчете литниково-питающих систем (ЛПС) позволяет обеспечить питание отливок без применения прибылей;

- интенсификация теплообмена между отливкой и формой при приложении давления позволяет существенно повысить плотность и эксплуатационные свойства отливок;

- автоматизация процесса заливки форм и герметизация тигля с расплавом (литье под низким давлением (ЛНД), литье с противодавлением (ЛПРД)) или формы (литье вакуумным всасыванием (ЛВВ), литье с противодавлением) позволяет улучшить условия труда и экологическую чистоту производства.

Как показала производственная практика, комплексная реализация этих преимуществ позволяет до 80% повысить коэффициент использования металла в заготовке, до 90% увеличить выход годного, на 20–30% увеличить прочностные свойства сплава в отливках и на 50–100% его пластические свойства.

Однако практическая реализация указанных преимуществ возможна лишь на основе разработки комплексной теории процессов формирования отливок при данных методах литья и методов оптимизации основных технологических параметров. В настоящее время в теории методов ЛРД существует ряд нерешенных проблем, что не позволяет в полной мере реализовать потенциальные возможно-

сти ЛРД и обуславливает сокращение их практического применения. К числу нерешенных проблем можно отнести:

- отсутствуют методы оптимального управления заливкой форм. В существующих установках обеспечивается практически линейный закон изменения перепада давлений на расплав в процессе заливки, темп которого постоянен во времени и на практике определяется методом проб и ошибок. В этих условиях качественное заполнение форм возможно лишь для отливок с относительно небольшими перепадами толщин стенок. Особые проблемы возникают при изготовлении сложных отливок, содержащих тонкостенные элементы. В этих случаях для обеспечения качественного заполнения форм приходится делать технологические напуски, что снижает коэффициент использования металла в заготовке и увеличивает трудоемкость механической обработки отливок;

- не разработаны методы расчета литниково-питающих систем (ЛПС). Ввиду отсутствия научно-обоснованных методов расчета ЛПС их конструирование осуществляется эмпирически. Процесс отладки и доводки технологии часто занимает несколько месяцев и сопряжен со значительными расходами;

- отсутствуют четкие требования к технологичности конструкции отливок с точки зрения специфики ЛРД;

- большое значение имеет повышение надежности технологии. При ЛРД количество определяющих факторов увеличивается, что предполагает необходимость разработки принципов оптимизации технологических процессов, обеспечивающих стабильное получение качественных отливок;

- из всех разновидностей методов ЛРД наибольшее распространение получило литье под низким давлением. Недостаточно разработана теория и технология литья вакуумным всасыванием, которое по сравнению с другими методами ЛРД имеет ряд существенных преимуществ, особенно для отливок сложной конфигурации с тонкостенными элементами.

Поэтому проблема повышения эффективности методов ЛРД на основе комплексной оптимизации процессов формирования отливок и расширения области применения указанных методов является весьма актуальной и имеет важное хозяйственное значение.

Цель работы. Разработка комплексной теории методов литья под регулируемым давлением и системы оптимального управления процессами формирования отливок. Работа выполнялась в соответствии с программами Гособразования СССР, АН СССР, Совета Министров СССР и Министерства образования РФ: математическое моделирование в научных технических системах; управление нелинейными динамическими объектами; новые технологии и автоматизация производственных процессов в машиностроении; математические методы моделирования и управления в народном хозяйстве; технология литейного производства (грант Министерства образования Российской Федерации).

Диссертация направлена на решение следующих задач:

- математическое моделирование и экспериментальные исследования гидродинамических, тепловых и газодинамических процессов при ЛРД. Определение границ применимости существующих методов управления заливкой форм;

- разработка и обоснование критериев оптимальности управления заливкой форм при ЛРД;
- разработка системы оптимального управления заливкой форм при ЛРД;
- постановка сопряженной краевой задачи тепломассопереноса при формировании отливок при ЛРД и разработка адекватного и устойчивого алгоритма ее численной реализации;
- выполнение компьютерного моделирования и экспериментов по исследованию заполняемости форм при ЛРД и разработка методов расчета максимальной продолжительности заливки форм сплавом;
- разработка рекомендаций по расчету оптимальной продолжительности заливки форм при ЛРД;
- разработка методов расчета разных типов ЛПС при ЛРД на основе оптимизации тепловых и гидродинамических процессов;
- обоснование рекомендаций по конструированию отливок с точки зрения обеспечения их направленного затвердевания в условиях ЛРД;
- создание системы автоматизированного проектирования технологического процесса изготовления отливок при ЛРД и проверка ее эффективности.

Научная новизна работы.

Выполненные исследования позволили получить следующие новые научные результаты:

- экспериментально и методом математического моделирования исследованы закономерности истечения расплава в полость формы при нижнем и боковом подводах сплава в условиях ЛРД и сформулированы условия, обеспечивающие плавное заполнение формы сплавом без возмущения свободной поверхности потока и образования поперечных вихревых зон;
- впервые в качестве критерия оптимальности гидравлического режима заполнения форм при ЛРД предложена степень отклонения значений скорости сплава в форме при заливке от соответствующих значений скорости изменения разности действующих на расплав пьезометрических напоров. Установлено, что плавное, качественное заполнение формы сплавом обеспечивается, если максимальные значения данного отклонения не превышают 10% независимо от наличия в полости формы резкого сужения или расширения ее поперечного сечения;
- определены условия применимости существующих методов управления заливкой формы при ЛРД;
- обоснован оптимальный кусочно-линейный характер изменения перепада давлений на расплав в процессе заливки форм при ЛРД. Разработана методика определения темпов изменения перепада давлений при заполнении металлопровода и участков полости формы, отличающихся площадями поперечного сечения;
- определены закономерности изменения разрежения или избыточного давления в камере машины ЛРД при управлении заливкой с помощью дросселирующего устройства с дискретно изменяющейся площадью проходного сечения;

- разработана система автоматизированного оптимального управления заливкой форм при ЛРД и получены формулы для расчета параметров для ее настройки;
- определены закономерности тепломассопереноса в потоке сплава при заполнении форм для тонкостенных отливок в условиях ЛРД, получены формулы для расчета максимальной продолжительности заливки;
- изучены гидравлические режимы работы семи основных типов ЛПС, получены формулы для определения оптимальных диапазонов технологических и геометрических параметров;
- методом математического моделирования изучено влияние естественной и вынужденной конвекции на кинетику затвердевания отливок при ЛРД, установлено существенное влияние естественной конвекции на организацию направленного затвердевания отливок при ЛРД;
- разработана методика оптимизации тепловых условий для основных типов ЛПС для ЛРД с точки зрения обеспечения непрерывного питания отливки из металлопровода.

Практическая значимость работы.

1. Разработана система автоматического оптимального управления заливкой форм при ЛРД, позволяющая значительно расширить сферу применения ЛРД и обеспечивающая качественное заполнение форм даже при десятикратном перепаде площадей поперечного сечения без применения технологических напусков. Это позволяет снизить трудоемкость механической обработки отливок.
 2. Разработана методика расчета литниково-питающих систем при нижнем, рассредоточенном, боковом, вертикально-щелевом подводе сплава, а также при заполнении формы через два расположенных на разных уровнях питателя. Применение указанных ЛПС и определение их размеров по предложенной методике позволяет во многих случаях исключить применение прибылей и до 90% повысить выход годного.
 3. Предложена методика оптимизации теплового режима кокилей в естественных условиях их охлаждения, обеспечивающая получение отливок со стабильным уровнем их эксплуатационных свойств.
 4. Разработана комплексная система автоматизированного расчета всех основных технологических параметров изготовления отливок применительно к ЛВВ, ЛНД и ЛПрД.
- Эффективность разработанной системы проверена на основных типах характерных для ЛРД промышленных отливок. Применение системы показало, что она позволяет быстро определить комплекс оптимальных значений технологических параметров, обеспечивающих получение качественных отливок с минимальной последующей доводкой технологии. При этом резко сокращаются расходы на разработку и освоение технологии, повышается качество отливок и экономические показатели производства. Система принята к использованию на предприятиях: ФГУП «Уралтрансмаш», ФГУП «Уральский оптико-механический завод», ОАО «Уральский турбомоторный завод», ОАО «Курганмашзавод» и ОАО «Уральский научно-исследовательский технологический институт». Вне-

дрение рекомендаций по оптимизации теплового режима металлических форм обеспечило получение экономического эффекта 94389 руб. в ценах 1989 года. Ожидаемый экономический эффект при использовании разработанной системы автоматизированного расчета технологических параметров в расчете на освоение технологии получения одной отливки составляет от 1000 до 10000 руб. в ценах 2003 г.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Для обеспечения качественного заполнения форм при ЛРД необходимо реализовать условия, при которых независимо от наличия участков расширения или сужения потока в полости формы отклонения скорости сплава от предписываемых кинетикой изменения перепада давлений значений не превышают 10%.
2. Оптимальное управление заливкой форм при ЛРД предполагает дискретное изменение темпа нарастания перепада газового давления при переходе расплава через участки резкого расширения или сужения потока в соответствии с предложенными рекомендациями.
3. Инерционными явлениями в газовой сети установок ЛРД при дискретном изменении площади управляющего дросселирующего устройства в системе оптимального управления заливкой можно пренебречь.
4. При организации питания отливок при ЛРД необходимо учитывать влияние естественной конвекции в затвердевающем расплаве, которая существенно смещает термический центр отливки и при характерном для ЛРД нижнем подводе сплава затрудняет обеспечение направленного затвердевания отливки.
5. Для обеспечения непрерывного питания отливки через ЛПС, их тепловые и геометрические характеристики должны обеспечивать рекомендованные значения отрицательных продольных градиентов продолжительности затвердевания сечений литников и отливки, а также продолжительности достижения центров сечений фронтом нулевой жидкотекучести.

Апробация работы.

Результаты работы доложены на международных конференциях в г. Липецке (1989 г.), Екатеринбурге (1999 г.), на V и VI съездах литейщиков России (2001, 2003 гг.), Республиканской конференции (г. Днепропетровск, 1990 г.), на региональных конференциях литейщиков в гг. Перми, Челябинске, Омске, Рыбинске и Екатеринбурге.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 32 работах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и приложения. Работа изложена на 270 страницах машинописного текста, содержит 81 таблицу и 171 рисунок. Библиографический список содержит 207 наименований.

Основное содержание работы

Во введении раскрыта актуальность темы диссертационной работы, дана ее общая характеристика, указаны цели и задачи диссертации.

В первой главе выполнен аналитический обзор данных, характеризующих современное состояние вопроса. Установлено, что при существующих методах управления заливкой с помощью включенного в газовую сеть дросселирующего устройства (ЛВВ, ЛНД, ЛПрД) реализуется аperiodический закон изменения разрежения (ЛВВ), избыточного давления (ЛНД) в камере машины или перепада давлений между нижней и верхней камерами (ЛПрД).

$$\Delta P_k = \Delta P_p (1 - \exp(-\beta t)), \quad (1)$$

где $\Delta P_k = P_a - P_k$ при ЛВВ; $\Delta P_k = P_k - P_a$ при ЛНД; $\Delta P_k = P_n - P_k$ при ЛПрД;

$\Delta P_p = P_a - P_p$ при ЛВВ; $\Delta P_p = P_n - P_a$ при ЛПрД; $\Delta P_p = P_p - P_a$ при ЛНД;

P_k – давление в камере машины;

P_a – атмосферное давление;

P_n – давление в камерах машины ЛПрД в начале процесса;

β – газодинамический коэффициент, зависящий при заданном значении объема камеры и величины ΔP_p от площади проходного сечения дросселя.

В установках ЛНД для управления заливкой чаще применяют автоматические устройства, реализующие линейный закон изменения избыточного давления в камере машины

$$\Delta P_k = mt, \quad (2)$$

где параметр m непосредственно характеризует темп нарастания избыточного давления.

В существующих установках процесс заливки форм осуществляется при заданных фиксированных значениях величин β и m . При этом рекомендации по определению значений β и m фактически отсутствуют. Расчет кинетики заполнения на практике, как правило, выполняют по формулам, полученным из допущения, что расплав строго следует за перепадом давлений

$$h \approx h_p = \frac{\Delta P_k}{\rho g}; \quad v \approx v_p = \frac{d(\Delta P_k)}{dt} \cdot \frac{1}{\rho g}. \quad (3)$$

Многочисленные экспериментальные данные показали, что уровень сплава h и скорость его движения v совершают колебания относительно значений h_p и v_p . При этом погрешность применения формулы (3) может быть очень значительной, особенно при больших перепадах площадей сечений отливки и высоких скоростях заливки.

Установлено, что при отношениях площади формы и металлопровода $\omega_\phi/\omega_n > 6$ и сужении сечений отливки более чем в 2 раза получение качественных отливок невозможно из-за интенсивного развития фонтанирования сплава. Поэтому реализуемые на практике зависимости (1) и (2) при управлении заливкой с гидродинамической точки зрения не являются оптимальными.

Предложенные в литературе критерии оптимальности гидродинамического режима заполнения формы основаны на распространении на ЛРД известных из гидравлики закономерностей истечения жидкости в безграничное пространство, что не соответствует реальными законам ЛРД. Рекомендованные ме-

тоды оптимального управления очень сложны для практической реализации и поэтому не применяются.

В литературе отсутствуют системные данные по оптимальной продолжительности заливки форм при ЛРД и методики их расчета. Применяемые методы математического моделирования затвердевания отливок при ЛРД, как правило, не учитывают влияние естественной конвекции расплава, которая при организации питания отливки через ЛПС из металлопровода препятствует обеспечению направленного затвердевания сплава в системе.

Не разработаны методы расчета минимальных уклонов на стенках отливок из алюминиевых сплавов, необходимых для обеспечения направленного затвердевания. Это затрудняет конструирование технологичных отливок. В настоящее время не созданы методы расчета ЛПС для ЛРД, обеспечивающие непрерывное питание отливок при разных способах подвода сплава и не разработаны критерии оценки их эффективности.

В целом в настоящее время практически отсутствуют научно обоснованные методы для выполнения на практике расчетов оптимальных значений технологических параметров при ЛРД, которые на производстве определяются в ходе длительной доводки технологии.

На основании анализа современного состояния вопроса в главе сформулированы основные задачи исследования, которые приведены выше.

Вторая глава посвящена оптимизации гидродинамических процессов при заполнении форм при ЛРД и обоснованию принципов и методов оптимального управления заливкой.

В качестве основного метода исследований было принято выполнение планированных машинных экспериментов по численному математическому моделированию гидродинамических процессов. Адекватность полученных в ходе моделирования результатов была проверена при выполнении экспериментов по гидромоделированию и заполнению металлических форм алюминиевым сплавом АК7ч при ЛВВ, ЛНД и ЛПРД.

На первом этапе были выполнены расчеты при компьютерном моделировании процесса заполнения формы при истечении сплава из металлопровода (питателя) при расширении потока. Расчеты выполняли при центральном подводе сплава и при подводе его через два питателя.

Для математического моделирования процесса был применен численный метод потоков, основанный на интегральных законах изменения импульса и массы. Соответствующие уравнения, написанные для некоторого выделенного объема жидкости V , имеют вид

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{(V)} \rho v_i dV = - \oint_S \Pi_{ik} dS_k + f_i; \quad (4)$$

$$\oint_S \bar{v} d\bar{S} = 0, \quad (5)$$

где $\bar{v}$ – вектор скорости, определенный в точках поверхности S , ограничивающей объем V ;

ρ – плотность жидкого сплава;

v_i – компоненты вектора скорости по координатной оси X_i ;

$\Pi_{ik} \cdot dS_k = (\rho v_i \cdot v_k - \sigma_{ik}) n_k dS$ – i -я компонента потока импульса через элемент поверхности dS ;

dS – абсолютная величина элемента поверхности.

$$\sigma_{ik} = -p\delta_{ik} + \mu\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i}\right), \quad (6)$$

где σ_{ik} – тензор напряжений в точках поверхности S для несжимаемой жидкости;

δ_{ik} – символ Кронекера;

μ – динамический коэффициент вязкости сплава;

p – давление жидкости;

f_i – проекция массовой силы (силы тяжести) на ось x_i .

Величина $K_i = \int_V \rho v_i dV$ представляет собой i -ю компоненту импульса жидкости, находящейся в заданном выделенном объеме пространства. В методе потоков производную $\partial K_i / \partial t$ в левой части уравнения (4) заменяют конечно-разностным выражением, т.е. принимают

$$\frac{\partial K_i}{\partial t} = \frac{K_i(t + \Delta t) - K_i(t)}{\Delta t},$$

Δt – шаг по времени.

Идея метода потоков состоит в разбиении пространства, занятого жидкостью, на элементарные ячейки различной конфигурации и решения для каждой ячейки уравнений (4–6). При этом скорость и давление внутри ячейки принимаются равномерно распределенными и отнесены к центру ячейки. Величины компонент скорости и тензора напряжений на граничной поверхности вычисляются по соответствующим аппроксимирующим уравнениям. Решение задачи осуществляется в 2 этапа. На первом этапе по уравнению (4) определяют поля скоростей на следующем шаге по времени. На втором этапе выполняют итерационный процесс вычисления поля давлений. При этом используется рекуррентная формула

$$p^{k+1} = p^k - B \cdot \text{Div} \vec{v}, \quad (7)$$

где p^{k+1} и p^k – значения давления на k -й и $(k+1)$ -й итерациях.

$\text{Div} \vec{v}$ – дивергенция вектора скорости, $\text{Div} \vec{v} = \frac{1}{V} \int_S \vec{v} \cdot d\vec{S}$.

На каждой итерации после вычисления по формуле (7) давлений по уравнению (4) вычисляют новые значения импульсов и новые поля скоростей. Итерации проводят до тех пор, пока во всех ячейках дивергенция скорости не достигнет малых, близких к нулю значений. Коэффициент B в (7) определяется эмпирически по условию устойчивости расчета и обеспечения приемлемой скорости сходимости итерационного процесса. В диссертации разработана методика расчета максимально допустимых значений коэффициента B , обеспечивающих устойчивость итерационного процесса. После завершения второго этапа переходят к расчетам на следующем шаге по времени.

Специфика рассматриваемой задачи по сравнению с известными из литературы решениями состоит в том, что мы имеем дело с изменением объема, занятого жидкостью, вследствие перемещения ее свободной поверхности. Возникает задача описания этого перемещения и использования подвижных сеток, т.е. переменных во времени объемов ячеек.

Моделирование проводили в декартовых и цилиндрических координатах. Расчет начинали при полностью заполненном металлопроводе (или питателе) и начальном положении уровня сплава в полости формы на некотором небольшом расстоянии H_{00} . Скорости в конце заполнения металлопровода определяли при решении соответствующего уравнения Бернулли. Пространство, занятое сплавом в металлопроводе, разбивали на прямоугольные ячейки с постоянными размерами HR и HU . При принятом постоянном числе горизонтальных рядов ячеек в полости формы в процессе перемещения свободной поверхности сплава вертикальные размеры ячеек в полости формы и их конфигурация будут изменяться.

Расчеты выполняли при аperiодическом законе изменения перепада давлений на расплав в соответствии с уравнением (1) в условиях ЛВВ и ЛНД при $\Delta P_p = 66640$ Па. В расчетах варьировали отношение площадей ω_f/ω_m и значение газодинамического коэффициента β . При выполнении расчетов на печать выводили значения компонент скоростей сплава в ячейках, уровней сплава в форме на свободной поверхности потока. Кроме этого на печать выводили данные по кинетике заполнения, рассчитанные по нестационарному уравнению Бернулли и по формуле

$$h_p = \frac{\Delta P_k}{\rho g} - H_u, \quad (8)$$

где $\Delta P_k = \Delta P_p (1 - \exp(-\beta t)) + \rho g (H_u + H_{00}) \exp(-\beta t)$;

t – время с начала заполнения формы.

Как показали результаты расчетов, конфигурация свободной поверхности потока сплава в форме с увеличением ω_f/ω_m и β все более отклоняется от плюской и отношение максимального значения уровня сплава Y_{MA} к минимальному значению Y_{MI} увеличивается, а величина $\varepsilon_Y = \frac{Y_{MA} - Y_{MI}}{Y_{MA}} \cdot 100\%$ может достигать 60% и более.

Для изучения внутренней структуры потока сплава были подвергнуты анализу расчетные поля скоростей. На рис. 1 приведен пример расчетных данных по характеру линий тока в потоке расплава. Анализ характера линий тока позволяет сделать следующие выводы:

- во всех случаях в периферийных частях потока формируются застойные (циркуляционные) зоны, протяженные вплоть до свободной поверхности потока;
- при подводе сплава через два симметрично расположенных питателя формируется две периферийные и две центральные застойные зоны;
- резкое расширение струи в проточной части происходит на расстоянии от свободной поверхности, не превышающем 0,2 от высоты потока. До этого расстояния скорости в проточной части составляют не менее 0,8 их значения на выходе из металлопровода;

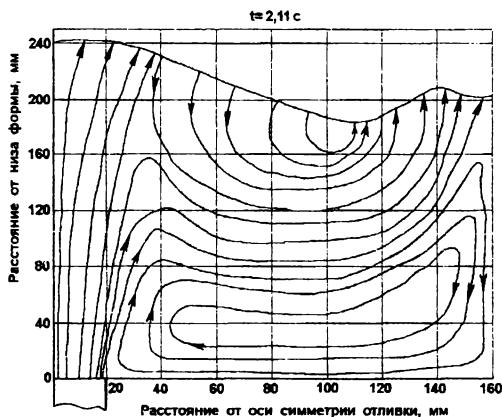


Рис. 1. Характер линий тока в потоке сплава АК7ч при заполнении полости формы при $\beta=0,06 \text{ с}^{-1}$

– в начальные моменты заполнения формы происходит фонтанирование сплава из металлопровода. Однако высота фонтана при всех рассмотренных условиях не превышает 10 мм. К моменту опадания фонтана завершается растекание потока в горизонтальном направлении, что соответствует времени 0,15–0,18 с с начала заливки;

– в процессе заливки вертикальные компоненты скорости v_y совершают затухающие колебания относительно значений v_p . В разных точках свободной поверхности колебания происходят с разными фазами.

Как видно из рис. 1, при больших перепадах уровней на свободной поверхности происходит переток расплава с более высоких уровней к низким. Это вызывает нарушение сплошности окисной пленки на головной части потока и способствует замешиванию ее в расплав. Как показал анализ полей скоростей, эти явления исключаются, если относительный перепад εY уровней не превышает 15%.

Для выполнения этого условия необходимо, чтобы величины β или m не превышали некоторые критические для каждого отношения ω_ϕ/ω_m значения $\beta_{кр}$ и $m_{кр}$. В диссертации получены зависимости для определения величины $\beta_{кр}$ и m для различных методов ЛРД.

Важнейшей задачей является разработка пригодной для инженерной практики методики расчета кинетики заполнения полости формы сплавом для отливок различных конфигураций.

Универсальная и надежная методика была создана на основе применения формул (3, 8), так как из всех характеристик отливки для их использования необходимы только высотные размеры. Если обеспечить этим формулам необходимую точность, то их можно применять для отливок любой конфигурации. Следует отметить, что данные формулы в том или ином виде в настоящее время используются на практике без достаточного основания.

Как показали данные расчетов, лабораторных и промышленных экспериментов по заполнению форм сплавом АК7ч и гидромоделирование, погреш-

ность применения данных формул при существующих методах управления заливкой при выполнении условия $\beta \leq \beta_{кр}$ или $m \leq m_{кр}$ не превышает 15% вплоть до $\omega_{\phi}/\omega_m \leq 8$. При этом также обеспечивается близкая к плоской конфигурация свободной поверхности потока при перепаде уровней меньше 15%. Для иллюстрации на рис. 2 приведены данные по характеру перемещения свободной поверхности сплава в форме по данным расчетов и гидромоделирования. При невыполнении этих условий применение формул становится неправомерным, так как погрешность может достигать 100% и более.

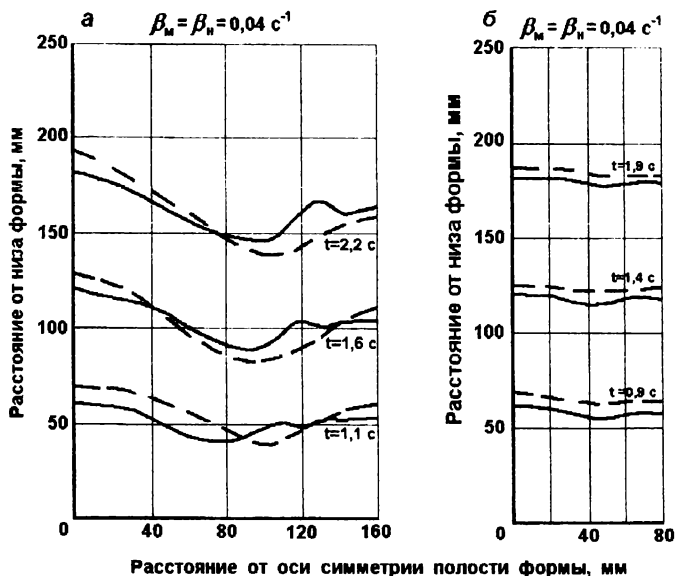


Рис. 2. Расчетные данные и результаты гидромоделирования по кинетике перемещения свободной поверхности сплава при заполнении формы при $\omega_{\phi}/\omega_m=8$ (а) и $\omega_{\phi}/\omega_m=4$ (б); $\beta_{кр}=0,02 \text{ c}^{-1}$ (а) и $\beta_{кр}=0,05 \text{ c}^{-1}$ (б): — — — данные машинного расчета; - - - - результаты гидромоделирования

В следующих сериях машинных экспериментов исследовали закономерности заполнения сплавом форм сложной конфигурации, схемы которых показаны на рис. 3. При переходе в верхнюю часть полости формы имеет место сужение потока. В расчетах варьировали отношение площадей верхней ω_{ϕ} и нижней ω_n частей в пределах от 0,1 до 0,8.

Как показали расчеты и эксперименты при заполнении формы сплавом АК7ч, при существующем методе управления заливкой, т.е. при неизменных в процессе заливки значениях коэффициентов β или m , при $\omega_{\phi}/\omega_n < 0,6$, т.е. при сужении потока более чем на 40%, имеют место колебания уровня сплава при заполнении тонкостенной части, вызванные интенсивным фонтанированием сплава вследствие увеличения скорости при сужении потока. Это приводит к образованию в отливках дефектов в виде спаев, оксидных плен и газовых несплошностей. Например, особые проблемы возникают при изготовлении мето-

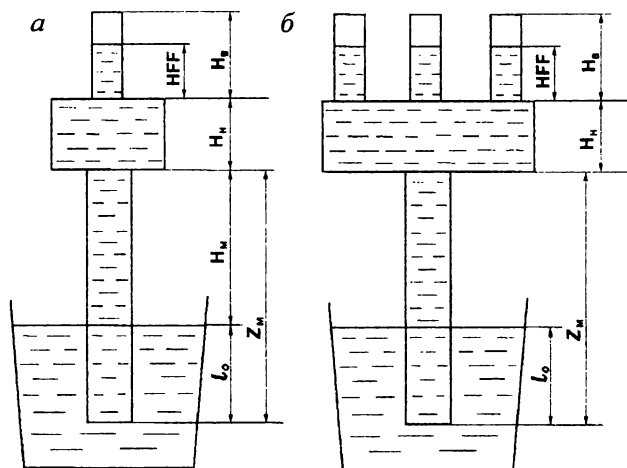


Рис. 3. Расчетные схемы заполнения формы

дами ЛРД отливок типа рабочих колес, представляющих собой сочетание нижней, протяженной в горизонтальном направлении части и расположенных сверху тонкостенных лопаток. Так как отношение суммарной площади лопаток к площади сечения нижней части очень часто меньше 0,2–0,3, при существующих методах управления заливкой качественное заполнение формы обеспечить не удастся. Приходится применять на лопатках технологические напуски, что сильно увеличивает трудоемкость механической обработки лопаток.

Таким образом, существующие методы управления заливкой при ЛРД обеспечивают получение качественных отливок лишь в ограниченных диапазонах перепадов площадей сечений участков отливок ($\Sigma\omega_{i+1}/\omega_i \geq 0,6$) и скоростей заливки ($\beta \leq \beta_{кр}$).

Выполненный анализ результатов математического и гидравлического моделирования, а также экспериментов по изготовлению отливок из алюминиевых сплавов позволил сформулировать следующие требования к оптимальной организации заливки форм сплавом:

- продолжительность заливки различных участков полости формы сплавом $t_{зал,i}$ должна находиться в оптимальном диапазоне значений;
- должны отсутствовать колебания уровня сплава в процессе заполнения полости формы;
- конфигурация свободной поверхности потока сплава в полости формы должна быть близка к плоской. Относительная величина перепада уровней сплава на свободной поверхности не должна превышать 15%, что исключает недопустимые с точки зрения качественного заполнения поперечные вихревые зоны в потоке сплава;
- погрешность применения для расчета кинетики заполнения формы формулы (8) не должна превышать 15%.

Как показали результаты расчетов, гидромоделирования процесса заполнения форм и эксперименты при изготовлении отливок из алюминиевых сплавов при ЛНД, ЛВВ и ЛПРД, в качестве комплексного критерия оптимальности гидравлического режима заполнения форм можно принять относительное отклонение скорости сплава v относительно соответствующих значений скорости v_p изменения действующих на расплав пьезометрических напоров

$$\varepsilon = \frac{|v - v_p|}{v_p} \cdot 100\%.$$

Комплексное выполнение указанных выше требований к организации заполнения форм обеспечивается, если независимо от наличия участков сужения или расширения потока величина указанного критерия оптимальности не превышает 10%.

В конце заполнения металлопровода колебания скорости сплава v относительно значений v_p практически сглаживаются. Увеличение величины ε на участках сужения или расширения поперечных сечений полости формы вызывается следующими обстоятельствами. При постоянном темпе изменения перепада давлений значение скорости v_p при заполнении металлопровода и полости формы остается практически неизменным. В местах расширения или сужения по-

тока скорость сплава изменяется в соответствии с формулой $v_{i+1} = v_i \frac{\omega_i}{\omega_{i+1}} \cdot 100\%$,

где v_{i+1} и v_i – скорости сплава в вышележащем и нижележащем участке полости формы, а ω_{i+1} и ω_i – площади поперечных сечений вышележащего и нижележащего участков. При этом возникают отклонения скорости сплава от неизменного значения v_p тем большие, чем больше различие площадей ω_i и ω_{i+1} . Это наглядно иллюстрируют данные по характеру изменения скорости сплава АК7ч при заполнении металлопровода и полости формы, приведенные на рис. 4а. Существенные отклонения скорости v от величины v_p приводят к интенсификации фонтанирования сплава и образованию дефектов в отливках. Для того чтобы минимизировать отклонения v от v_p , необходимо в моменты перехода сплава через участки сужения и расширения потока соответствующим образом изменять темп нарастания разрежения или избыточного давления в камере машины, т.е. так изменять значения скорости v_p , чтобы они были близки к скоростям движения сплава при заполнении соответствующих участков полости формы. В отличие от существующих методов управления заливкой при этом реализуется кусочно-линейный характер изменения перепада давлений на расплав, характеризующийся различными значениями коэффициентов β_i и m_i , при заполнении участков формы, отличающихся площадями поперечных сечений.

В результате выполненных машинных экспериментов по математическому моделированию заполнения форм при предложенном оптимальном способе управления заливкой были получены следующие формулы для определения величин β_i и m_i , при которых выполняются сформулированные выше условия качественного заполнения форм независимо от наличия участков резкого сужения или расширения площадей сечений отливок.

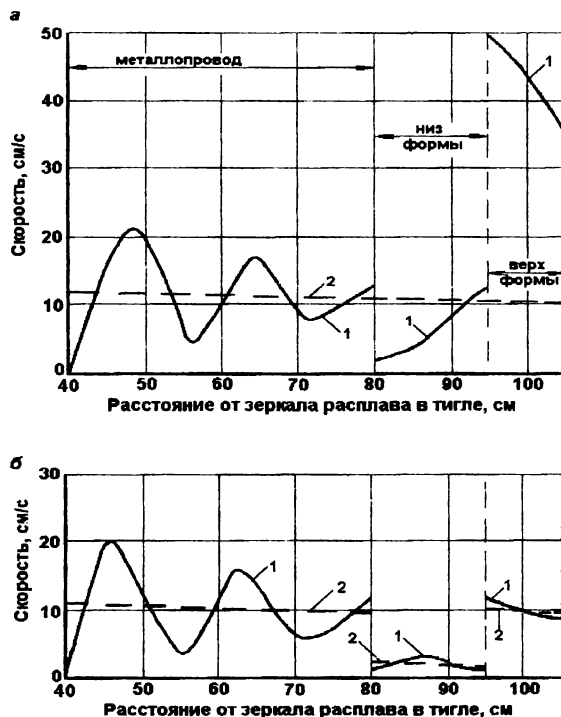


Рис. 4. Данные по характеру изменения скорости сплава при заполнении металлопровода, нижней и верхней части формы при $H_n=150$ мм; $H_b=100$ мм; $l_0=400$ мм; $Z_m=800$ мм; $\omega_n/\omega_m=8$; $\omega_b/\omega_n=0,2$; 1 – v ; 2 – v_p

Для расширения потока:

$$\beta_i = (\beta_{i+1} \frac{\omega_{i+1}}{\omega_i}) / K_1; \quad (9) \quad m_i = (m_{i+1} \frac{\omega_{i+1}}{\omega_i}) / K_1, \quad (10)$$

где β_i и β_{i+1} , m_i и m_{i+1} – значения коэффициентов при заполнении участков до и после расширения потока;

K_1 – поправочный коэффициент, рассчитываемый по приведенным в диссертации графикам.

Для сужения потока:

$$\beta_i = (\beta_{i+1} \frac{\omega_{i+1}}{\omega_i}) / K_2; \quad (11) \quad m_i = (m_{i+1} \frac{\omega_{i+1}}{\omega_i}) / K_2, \quad (12)$$

где β_i и β_{i+1} , m_i и m_{i+1} – значения коэффициентов при заполнении участков до и после сужения потока;

K_2 – поправочный коэффициент, рассчитываемый по приведенным в диссертации графикам.

Коэффициенты K_1 и K_2 учитывают, что растекание сплава после изменения поперечного сечения потока осуществляется не мгновенно.

На рис. 4,б приведены данные по характеру изменения скорости сплава при заполнении формы сплавом АК7ч при оптимальном управлении заливкой. При этом значение коэффициента β для заполнения металлопровода и участков полости формы определены по приведенным выше формулам. Как видно из рис. 4,б значение критерия ε не превышают 10%. При этом было обеспечено получение качественных отливок, несмотря на пятикратное сужение площади сечения отливки при переходе в тонкостенную часть.

Экспериментальная проверка полученных расчетных формул и предложенного метода управления осуществлялась при гидро моделировании и при изготовлении модельных и промышленных отливок из сплава АК7ч. При гидро моделировании при геометрическом подобии с масштабом 1:1 обеспечивали равенство критериев Рейнольдса и Фруда путем обеспечения равенства $\Delta P_p / \rho$ для опытов на сплаве и воде. В экспериментах по заполнению форм алюминиевыми сплавами измеряли скорость заполнения с применением записи изменения падения напряжения на вертикально натянутой в полости формы нихромовой нити диаметром 0,1 мм.

Схема установки приведена на рис. 5. Для иллюстрации на рис. 6 приведены расчетные и экспериментальные данные по кинетике заполнения верхней

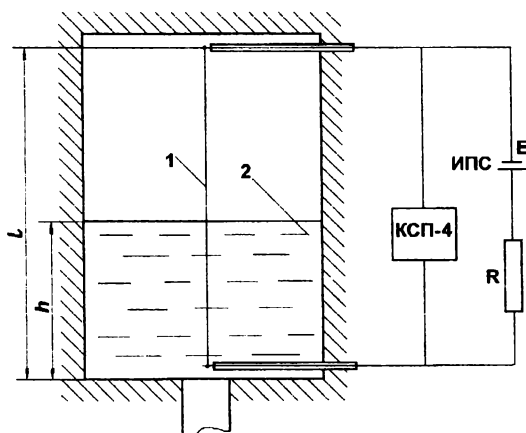


Рис. 5. Электрическая схема исследования процесса заполнения формы сплавом: 1 – нихромовая нить; 2 – жидкий расплав

части изображенной на рис. 3,а полости формы при применении существующего метода управления заливкой и при оптимальном управлении.

Эксперименты, выполненные на промышленных отливках, показали высокую эффективность предложенного метода управления заливкой при отношениях площадей сечений отливки от 0,1 до 10 и скоростях заливки до 20 см/с, что практически охватывает номенклатуру отливок, изготавливаемых методом ЛРД. Предложенный метод целесообразно применять, если необходимые значения $\beta_{кр}$ и $m_{кр}$ и,

если в конструкции отливки есть участки сужения сечений при $\omega_n/\omega_m < 0,6$. В

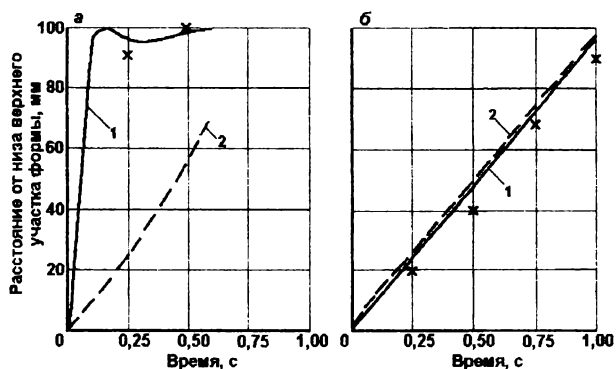


Рис. 6. Расчетные и экспериментальные данные по кинетике заполнения верхней части формы сплавом АК7ч при $\omega_n/\omega_m=4$ и $\omega_n/\omega_m=0,2$ при существующем (а) и оптимальном (б) методе управления заливкой: 1 – данные машинного расчета; 2 – расчет по формуле (8); x – экспериментальные данные

остальных случаях допустимо применение существующих методов.

В главе 3 рассмотрены вопросы разработки автоматизированной системы управления газодинамическими процессами в газовой сети с дросселирующими устройствами, реализующей предложенный в гл. 2 оптимальный кусочно-линейный закон изменения разрежения или избыточного давления в камере машины.

Разработанная система представляет собой несколько параллельно встроенных в газовую сеть дросселей (диафрагм) с разными проходными сечениями, которые автоматически подключаются к системе в соответствующие моменты времени. Настройка данной системы предполагает определение площадей проходных сечений диафрагм, обеспечивающих при истечении воздуха через них изменение разрежения или избыточного давления в камере машины с рекомендованными значениями газодинамического коэффициента β , а также расчет времен включения в систему той или иной диафрагмы. Переключение диафрагм осуществляется автоматически с помощью реле времени.

С целью исследования закономерностей газодинамических процессов при истечении воздуха через ряд последовательно включаемых диафрагм с разными проходными сечениями и получения формул для расчета площадей диафрагм, обеспечивающих реализацию изменения разрежения или избыточного давления в камере машины с заданными значениями коэффициента β были выполнены компьютерные расчеты по решению соответствующих математических моделей применительно к условиям ЛВВ, ЛНД и ЛПрД. Математические модели были разработаны на основе нестационарных уравнений газовой динамики в адиабатическом приближении с учетом инерционности газового потока.

При проведении расчетов определяли закономерности изменения давления в камере машины при варьировании объема камеры V_k , разрежения или избыточного давления в ресивере ΔP_p , а также площади проходного сечения диафрагмы ω_1 , включаемой в начале процесса. При ЛПрД варьировали начальное избыточное давление $\Delta P_p = P_n - P_a$. Расчеты выполняли при дискретном подключении диафрагм с разными площадями проходного сечения в соответствующие моменты времени. Было предусмотрено включение 4-х диафрагм при выполнении расчетов в условиях ЛВВ и ЛПрД и 3-х диафрагм в расчетах при ЛНД.

Анализ расчетных данных показал, что с погрешностью, не превышающей 10%, изменение разрежения или избыточного давления в камере машины при истечении воздуха через различные диафрагмы может быть описано уравнениями:

при литье вакуумным всасыванием:

$$P_{k0} - P_k = (P_{k0} - P_p)(1 - \exp(-\beta_i t)); \quad (13)$$

при литье под низким давлением:

$$P_k - P_{k0} = (P_p - P_{k0})(1 - \exp(-\beta_i t)); \quad (14)$$

при литье с противодавлением:

$$P_{k0} - P_k = (P_{k0} - P_a)(1 - \exp(-\beta_i t)), \quad (15)$$

где P_{k0} – давление в камере в момент включения соответствующей диафрагмы.

Для первой диафрагмы (при $t=0$ $P_{k0}=P_a$ при ЛВВ и ЛНД и $P_{k0}=P_n$ при ЛПрД);

β_i – газодинамический коэффициент, определяющий темп создания разрежения или избыточного давления при истечении воздуха через данную диафрагму.

Время t в данных зависимостях отсчитывается с момента включения данной диафрагмы.

Для расчета коэффициентов β_i были получены следующие формулы.

$$\beta_i = 1330000 \frac{\omega_{di}}{\Delta P_p^{0,79} V_k} \quad (\text{для ЛВВ}); \quad (16)$$

$$\beta_i = 180149 \frac{\omega_{di}^{1,02}}{\Delta P_p^{0,58} V_k}, \quad (\text{для ЛНД}); \quad (17)$$

$$\beta_i = 19253 \frac{\omega_{di}^{1,063}}{\Delta P_p^{0,303} V_k}, \quad (\text{для ЛПрД}), \quad (18)$$

где ω_{di} – площадь проходного сечения диафрагмы, м²;

V_k – объем камеры, м³;

$\Delta P_p = (P_{k0} - P_p)$ для ЛВВ; $\Delta P_p = (P_p - P_{k0})$ для ЛНД; $\Delta P_p = (P_{k0} - P_a)$ для ЛПрД.

Формулы позволяют выполнить расчет изменения разрежения или избыточного давления в камере машины в ходе всего процесса истечения воздуха при включении в соответствующие моменты времени t_i диафрагм с разными проходными сечениями ω_{di} . Эти формулы аппроксимируют результаты машинных расчетов с погрешностью, не превышающей 10%. То, что вид формул универсален в ходе истечения воздуха через все включаемые диафрагмы, свидетельствует о несущественном влиянии инерционности газового потока. С

использованием формул (16–18) получены зависимости, позволяющие определить значения площадей дросселирующих устройств $\omega_{дi}$, обеспечивающих реализацию заданных значений газодинамических коэффициентов β_i .

Для экспериментального исследования закономерностей изменения разрежения (ЛВВ) или избыточного давления (ЛНД, ЛПрД) в камерах машины при дискретном изменении площади проходного сечения дросселирующего устройства и проверки адекватности полученных формул в газовую сеть установок между камерой и ресивером были включены конструкции, позволяющие последовательно включать в процесс диафрагмы различных проходных сечений.

В экспериментах осуществляли съемку на видеокамеру шкалы вакууметра (или манометра), установленного на камере. Эксперименты проводили на универсальной установке, которая может работать как в режиме ЛВВ, так и в режиме ЛНД, а также на установке для ЛПрД ВП-1000.

Как показали эксперименты, характер изменения разрежения (ЛВВ) или избыточного давления (ЛНД) в камере машины может быть с погрешностью, не превышающей 10% описан полученными уравнениями. Для иллюстрации на рис. 7 приведены расчетные и экспериментальные данные по характеру измене-

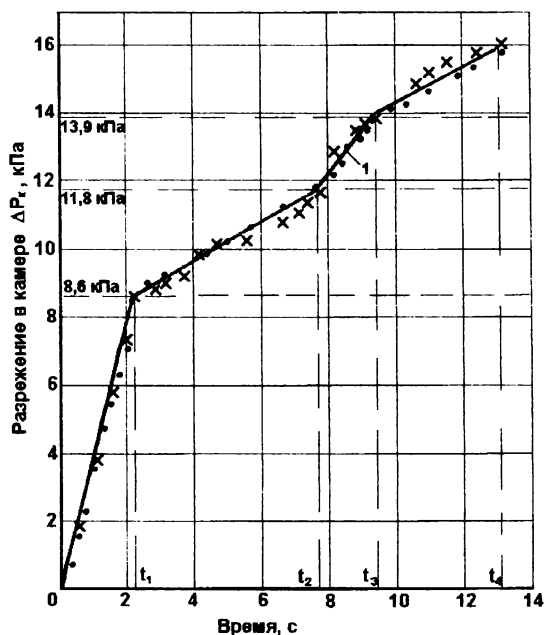


Рис. 7. Расчетные и экспериментальные данные по характеру изменения разрежения в камере машины для ЛВВ при $\Delta P_p = 66640$ Па,

$$\omega_{\partial 1} = 18,9 \text{ мм}^2, \omega_{\partial 2} = 3,15 \text{ мм}^2, \omega_{\partial 3} = 6,3 \text{ мм}^2, \omega_{\partial 4} = 3,15 \text{ мм}^2;$$

1 — данные расчета на ЭВМ; о — расчет по формулам (13), (16);

х — экспериментальные данные

ния разрезания в камере установки ЛВВ при некоторых условиях.

Как показало практическое опробование разработанной системы автоматического управления заливкой, ее инерционность не превышает 0,1 с.

Глава 4 посвящена разработке методов расчета оптимальной продолжительности заливки при ЛРД.

С целью экспериментального определения оптимальных диапазонов продолжительностей заливки форм для отливок при ЛРД была выполнена укрупненная классификация конфигурации отливок. При этом были выделены следующие типы:

- отливки вертикальной протяженности;
- отливки горизонтальной протяженности;
- отливки корпусного типа или типа полого цилиндра;
- отливки, представляющие собой комбинацию рассмотренных выше типов;
- отливки сложной конфигурации;
- отливки, содержащие протяженные тонкостенные элементы с толщиной стенки меньше 10 мм.

На рис. 8 приведены примеры отливок указанных типов.

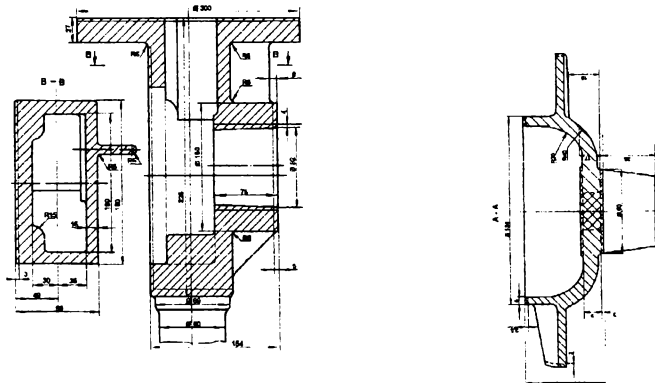
С целью определения оптимальных продолжительностей заливки выполняли эксперименты по изготовлению отливок указанных типов из сплава АК7ч методами ЛВВ и ЛНД. В экспериментах для различных размеров и условий заливки осуществляли заполнение форм при разных скоростях заливки. Управление скоростью заливки осуществляли изменением проходного сечения диафрагм в вакуумной или газовой сети. В экспериментах измеряли продолжительность заливки $t_{зал}$. Скорость заполнения рассчитывали по формуле $v_{зал} = H_{отл} / t_{зал}$.

Качество отливок оценивали внешним осмотром, анализом шлифов продольных и поперечных сечений, исследованием пористости темплетов, вырезанных из отливок, с применением метода гидростатического взвешивания. В результате статистической обработки результатов экспериментов для определения оптимальных диапазонов продолжительности заливки получены формулы для расчета минимальных и максимальных значений продолжительности заливки для указанных типов отливок в зависимости от их геометрических размеров и тепловых условий заливки.

Реальные отливки, относимые к указанным типам, имеют конфигурационные усложнения в виде ребер, фланцев, бобышек и т.п. и могут содержать стенки разной толщины. Как показала проверка полученных формул на промышленных отливках, они обеспечивают получение качественных отливок, если в качестве толщины стенки принимать преобладающую толщину, как это принято в общей теории литейных систем.

Многие отливки настолько сложны по своей конфигурации, что их сложно отнести к какому-нибудь из рассмотренных типов. Пример такой отливки приведен на рис. 8 (отливка «Корпус»).

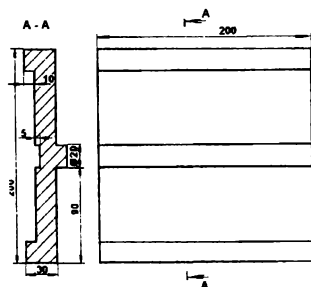
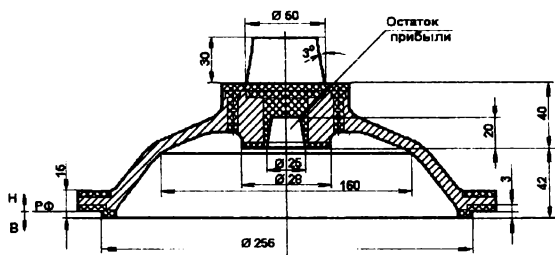
Для проверки возможности применения для таких отливок для расчета оптимальной продолжительности заливки известной формулы $t_{онм} = S_1 \sqrt[3]{\delta G}$,



1. Нижний центральный подвод сплава

Отливка «Корпус» (отливка типа 5, сложная конфигурация)

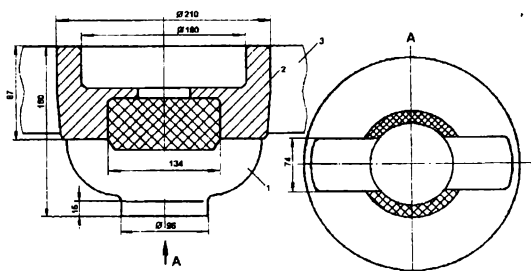
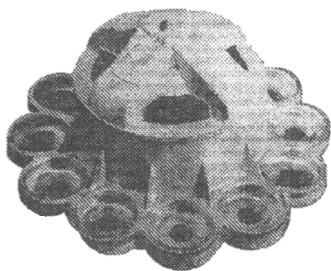
Отливка «Крыльчатка» (отливка типа 4, комбинированный тип)



Отливка «Крышка спидометра» (отливка типа 2, горизонтальной протяженности)

Отливка «Щека» (отливка типа 1, вертикальной протяженности)

2. Нижний рассредоточенный подвод сплава

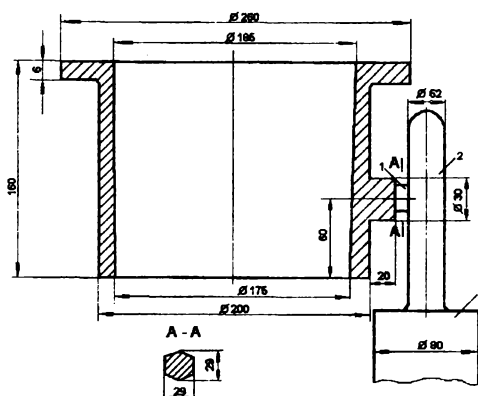


Отливка «Основание» (отливка типа 3, корпусного типа)

Отливка «Крыльчатка» (отливка типа 2, горизонтальной протяженности)

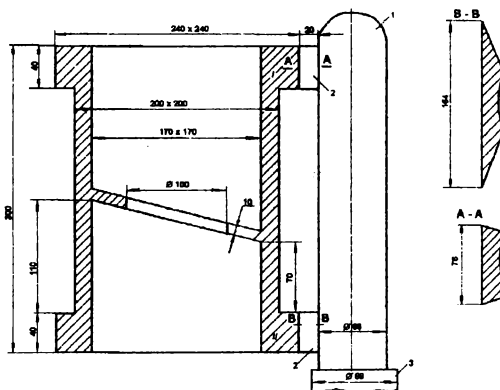
Рис. 8. Основные типы отливок и литниково-питающих систем (ЛПС)

3. Боковой подвод сплава



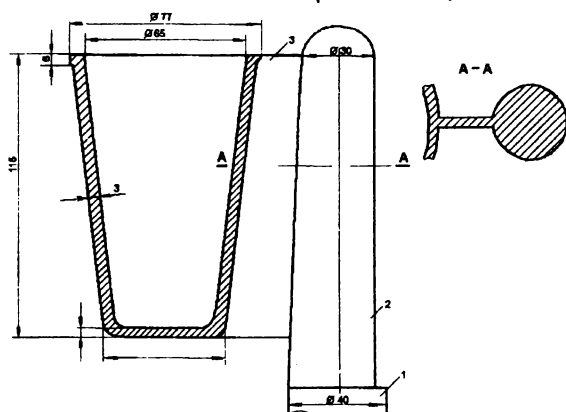
Отливка «Цилиндр»
(отливка типа 3, полый цилиндр)

4. Подвод на двух уровнях



Отливка «Корпус»
(отливка типа 3, полый цилиндр)

5. Вертикально-щелевая система



Отливка «Форма для выпечки кексов»
(отливка типа 3, полый цилиндр)

Рис. 8. (продолжение)

где δ – преобладающая толщина стенки, мм; G – масса жидкого сплава в форме на одну отливку, кг, были проведены эксперименты по изготовлению 30 типовых наименований отливок из сплава АК7ч при ЛВВ и ЛНД. Статистическая обработка данных по максимальной продолжительности заливки этих отливок показала адекватность данной формулы при значении эмпирического коэффициента $S_1=2,8\pm0,4$.

Следует отметить, что во всех рассмотренных выше экспериментах данные, полученные при ЛВВ и ЛНД, практически совпадали. Изготовление ряда типовых отливок на машине ВП-1000 показало применимость полученных формул для условий ЛПрД.

Качественное заполнение тонкостенных отливок или их элементов с толщиной стенки <10 мм определяется заполняемостью форм, которую количественно можно охарактеризовать продолжительностью течения сплава в форме до остановки потока $t_{\text{теч}}$. В основу разработки методики расчета величины $t_{\text{теч}}$ положена математическая модель, включающая интегральные законы изменения импульса, неразрывности потока и внутренней энергии. Для численного исследования модели был применен описанный выше метод потоков. Пространство, занятое расплавом, разбивается на элементарные ячейки, верхние и нижние границы которых перемещаются в вертикальном направлении. Кроме уравнений (4–7) для каждой ячейки, занятой сплавом, в принятой модели использованы уравнения изменения внутренней энергии в ячейке E .

$$\frac{dE}{dt} = - \oint_S P_e \cdot dS, \quad (19)$$

где E – теплосодержание сплава в ячейке с учетом теплот плавления или кристаллизации сплава;

$P_e = (Hv_i - \partial U / \partial X_i) - i$ -я компонента плотности потока внутренней энергии через элемент dS ;

H – теплосодержание единицы объема сплава при данной температуре;

$U = \int_0^T \lambda(T) dT$ – функция Гудмена; $\lambda(T)$ – теплопроводность сплава.

В процессе обработки результатов расчетов по решению уравнений разработанной математической модели получена следующая формула для расчета величины $t_{\text{теч}}$ для сплава АК7ч

$$t_{\text{теч}} = 3,04 + 1,76X_1 + 0,77X_2 + 0,38X_3 + 0,33X_4 + 0,35X_1X_2 + 0,15X_1X_3 + 0,17X_1X_4 + 0,1X_2X_3, \quad (20)$$

где $X_1 = (R_0 - 3,5)/1,5$; $X_2 = (\delta_{\text{кр}}/\lambda_{\text{кр}} - 4,5)/1,5$; $X_3 = (T_{10} - 725)/25$;

$X_4 = (T_{20} - 200)/50$; $X_5 = (\beta - 0,02)/0,01$;

R_0 – половина толщины стенки, мм

$\delta_{\text{кр}}$ и $\lambda_{\text{кр}}$ – толщина и теплопроводность кокильного покрытия;

T_{20} – начальная температура формы, °С.

В диссертации получено также аналогичное уравнение для широкоинтервального алюминиевого сплава АЛ7-3Л.

В диссертации получено также аналогичное уравнение для широкоинтервального алюминиевого сплава АЛ7-ЗЛ.

Как показали расчеты, уравнение (20) вследствие практически линейной зависимости $t_{\text{теч}}$ от R_0 можно применять и вне принятого интервала изменения R_0 в пределах $1,5 \leq R \leq 6$ мм.

Экспериментальное исследование заполняемости форм было проведено при заливке форм для плоских, вертикально расположенных тонкостенных отливок из сплава АК7ч на установках ЛНД и ЛВВ. Отливки заливали в открытые сверху формы высотой 300 мм. Отливки заливались через металлопровод диаметром 50 мм и нижний расширяющийся до ширины отливки щелевой питатель. Толщина кокильного покрытия на основе оксида цинка составляла 0,1; 0,15 и 0,2 мм.

Для исследования кинетики заполнения и изменения температуры головной части потока применяли специальную измерительную следящую систему, обеспечивающую синхронно с уровнем сплава перемещение спая хромель-алюмелевой термопары. Скорость движения сплава измеряли по изменению падения напряжения на натянутой в полости формы нихромовой нити при ее шунтировании поднимающимся в форме сплавом.

Как показали эксперименты, температура на оси головы потока вплоть до его остановки превышает температуру нулевой жидкотекучести. Это является подтверждением принятого в расчетной схеме механизма остановки потока путем перехвата фронтами нулевой жидкотекучести поперечного сечения потока.

Эксперименты по исследованию процесса заполнения форм для тонкостенных отливок показали, что при ЛРД вследствие действия непрерывно нарастающего перепада давлений на расплав, скорость сплава в ходе заполнения формы практически не изменяется вплоть до остановки потока, что обеспечивает высокую заполняемость форм. Поэтому высоту заполненной части формы можно достаточно точно определить по формуле $H_{\text{зап}} = v_p t_{\text{теч}}$. Естественно, что при этом должны быть выполнены условия плавного заполнения, приведенные в гл.2.

Глава 5 посвящена оптимизации гидравлического режима литниково-питающих систем (ЛПС).

Как правило, ЛПС при ЛРД не является регуляторами продолжительности заполнения форм. Гидравлический расчет ЛПС сводится к определению их оптимальных размеров, при которых выполняются условия плавного, качественного заполнения форм, сформулированные в гл. 2. Литниковые каналы создают дополнительные возмущения в потоке сплава и оказывают существенное влияние на гидродинамический режим заполнения форм.

В диссертации рассмотрены закономерности гидродинамических процессов при заполнении формы через 7 основных типов ЛПС:

- ЛПС при нижнем центральном подводе сплава непосредственно через металлопровод или установленную в ней втулку;
- нижняя рассредоточенная ЛПС;
- боковая рассредоточенная ЛПС;
- ЛПС при нижнем боковом подводе сплава;

- ЛПС при боковом подводе на некотором уровне;
- ЛПС при подводе сплава на двух уровнях;
- вертикально-щелевая ЛПС.

Основные типы ЛПС приведены на рис. 8.

Исследования гидродинамических процессов при работе ЛПС проводили путем выполнения машинных экспериментов по исследованию разработанных для каждого типа систем математических моделей. Математические модели представляют собой нестационарные гидродинамические уравнения, полученные на основе теоремы об изменении механической энергии жидкости с учетом специфики каждого типа ЛПС. В процессе исследования моделей определяли кинетику заполнения литниковых каналов и полости формы с учетом геометрических размеров ЛПС, полости формы и газодинамических параметров процесса.

Адекватность полученных результатов и расчетных формул проверялась при гидромоделировании и при получении модельных и промышленных отливок из сплава АК7ч в условиях ЛНД, ЛВВ и ЛПРД.

Гидродинамические условия при подводе непосредственно через металлопровод детально рассмотрены в гл.2. При подводе через втулку при переходе сплава из металлопровода во втулку имеет место дросселирование сплава, которое может привести к колебаниям его уровня как во втулке, так и в полости формы. Как показали результаты математического моделирования и натурные эксперименты, для обеспечения качественного заполнения формы диаметр втулки следует выбирать таким образом, чтобы при соблюдении рекомендаций гл.2 выполнялось условие $\omega_n/\omega_m \geq 0,6$. Для сглаживания колебаний скорости сплава при заполнении втулки ее высота должна превышать некоторые минимальные значения, для определения которых в диссертации разработаны рекомендации.

В отличие от рассмотренной ЛПС рассредоточенный подвод сплава через распределенные по периметру отливки питатели осуществляется при горизонтальном расположении питателей или с небольшим увеличением их уровня. Так как геометрический напор при заполнении питателей при этом не изменяется, то происходит монотонное возрастание скорости сплава в питателях. На выходе из питателей скорость сплава v существенно превышает значения v_p . Это приводит к нарушению сформулированных в гл.2 условий оптимальности гидродинамического режима заполнения формы. Критерий оптимальности ε может достигать 40% и более.

Поэтому для обеспечения качественного заполнения форм через данные ЛПС необходимо применять оптимальное управление заливкой форм, при котором металлопровод с питателями и полость формы заполняются с разными значениями коэффициентов β и m . В диссертации получены формулы для расчета газодинамических параметров.

Организация управления заливкой с использованием предложенных рекомендаций обеспечила получение качественных отливок без колебаний уровня сплава в процессе заливки.

Если термический центр отливки расположен сбоку внизу или на некоторой высоте, целесообразно применение боковой ЛПС. В данном случае длина питателей невелика (не более 30–50 мм). Поэтому можно принять, что ЛПС за-

полняется мгновенно и скорость сплава на выходе из питателя практически равна $v_n = v_p$.

При выполнении условия $\omega_n/\omega_m \geq 0,6$ условия качественного заполнения соблюдаются в широком интервале значений $\omega_\phi/\omega_n \geq 1$ и β или m . Если в отливке есть сужение потока, превышающее 40%, то следует применять оптимальное управление.

Боковой подвод на некотором уровне применим, если уровень питателя над низом формы не превышает 50 мм. Как показала практика применения этих систем, при большей высоте падения алюминиевых сплавов в полость формы из питателя возникают дефекты, связанные с окислением сплава и разрывом оксидной пленки. Поэтому при более высоком положении термического центра или нескольких термических центрах по высоте отливки следует осуществлять подвод сплава на двух или нескольких уровнях (рис. 8).

В ходе компьютерных расчетов по решению гидродинамических уравнений установлено, что влияние площадей питателей на продолжительность заливки незначимо в принятых диапазонах их варьирования ($0,2 \leq \omega_n/\omega_c \leq 2$ и $0,2 \leq \omega_\phi/\omega_c \leq 2$). Для исключения колебаний уровня сплава в стояке его площадь должна удовлетворять условию $\omega_c \geq 0,6 \omega_m$. Гидравлический расчет данных систем сводится к определению значений газодинамических коэффициентов и определению минимального значения отношения площадей нижнего питателя ω_n и стояка ω_c , при которой максимальный перепад уровней сплава в стояке и полости формы ΔH не превышает допустимых значений. Как показали лабораторные и промышленные эксперименты, при $\Delta H > 30-50$ мм при литье алюминиевых сплавов происходит сильное возмущение свободной поверхности сплава в форме падающей из верхнего питателя струей сплава после заполнения стояка. Это приводит к замешиванию оксидной пленки в расплав и браку отливок по пленам.

В диссертации разработаны формулы для расчета коэффициентов β или m , а также минимальной площади нижнего питателя в зависимости от высоты стояка и отливки, площади формы и стояка.

Вертикально-щелевые системы применяются при заполнении форм для отливок с протяженными тонкими стенками и при наличии нескольких термических узлов по высоте отливки. Как показали результаты гидромоделирования при заполнении формы через вертикально-щелевую ЛПС в месте перехода сплава из щели в полость формы имеет место гидравлический прыжок. При перепаде уровней сплава на щели ΔH , превышающем 40 мм, гидравлический прыжок сопровождается образованием обширной поперечной вихревой зоны на свободной поверхности сплава. В полученных отливках при этом наблюдаются оксидные пленки, которые замешиваются в расплав при возмущении головы потока сплава при заливке. Поэтому ЛПС должна быть сконструирована таким образом, чтобы перепад уровней сплава в стояке и полости формы ΔH не превышал 40 мм. Для ограничения высоты падения струи из стояка в указанных пределах ширина щели должна быть не меньше некоторого минимального значения $b_{\min}$. В результате обработки машинных экспериментов по решению гидродинамических уравнений получены формулы для расчета минимальных значений ширины щели и значений газодинамических коэффициентов β

или m обеспечивающих заливку формы за заданное время. Для исключения колебаний уровня сплава в стояке должно выполняться условие $\omega \geq 0,6 \omega_m$. Гидравлический расчет вертикально-щелевых ЛПС сводится к определению диаметра стояка и значения коэффициентов β или m и минимальной ширины щели.

Приведенные в гл. 5 рекомендации являются необходимыми с точки зрения оптимизации гидравлического режима заливки. Для окончательного решения вопроса о выборе размеров ЛПС необходимо рассмотреть тепловые условия их работы с точки зрения обеспечения непрерывного питания отливки из металлопровода через литники. Этим вопросам посвящена гл.6. Непрерывное питание отливки из металлопровода через ЛПС требует обеспечения направленного к металлопроводу затвердевания отливки и литников. В качестве условия направленного затвердевания таких объемно затвердевающих сплавов, как алюминиевые, было принято следующее требование: продолжительности затвердевания поперечных сечений отливки и литников $\tau_{затв}$, а также продолжительности достижения центров сечений фронтом нулевой жидкотекучести $\tau_{н.ж.}$, должны монотонно увеличиваться по направлению к металлопроводу. При этом $\frac{\partial \tau_{н.ж.}}{\partial y} < 0$ и $\frac{\partial \tau_{затв}}{\partial y} < 0$, где y -- расстояние соответствующего сечения от металлопровода. Для обеспечения фильтрационного питания необходимо, чтобы продолжительность затвердевания сечения отливок в месте подвода литников была меньше продолжительности снятия перегрева во входном сечении литников. Это также обеспечивает слив металла после затвердевания отливки и повышение выхода годного.

Специфика методов ЛРД состоит в том, что при нижнем подводе сплава естественная конвекция сплава затрудняет организацию направленного затвердевания вследствие выноса более нагретого расплава вверх. Напротив охлаждение расплава в процессе заполнения формы должно способствовать направленному затвердеванию.

Для исследования влияния процесса заполнения формы и естественной конвекции сплава на процесс затвердевания отливки были выполнены эксперименты по машинному моделированию заполнения форм и затвердевания плоских отливок из сплава АК7ч в условиях ЛВВ. В расчетах осуществляли решение комплексной краевой задачи, включающей в себя гидродинамические и теплофизические уравнения. На этапе заполнения формы в систему уравнений входили уравнения (4–7,19). На этапе затвердевания сплава после заполнения формы для учета влияния естественной конвекции во всех элементарных ячейках с температурой выше температуры нулевой жидкотекучести расчет полей скоростей осуществляли с учетом представления массовой силы f_i в приближении Буссинеска.

$$f_y = -g \Delta x \cdot \Delta y \cdot \rho_0 (1 + \alpha_m (T_0 - T(t))),$$

где ρ_0 – плотность сплава при температуре T_{10} ;

$T \leq T_0$ – температура сплава в ячейке в данный момент времени;

α_t – коэффициент термического расширения жидкого сплава (для сплава АК7ч было принято $\alpha_t = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}$).

Решение задачи осуществляли по описанному выше методу потоков. В расчетах фиксировали продолжительность прохождения центров элементарных ячеек фронтами ликвидуса $\tau_{\text{ликв}}$, нулевой жидкотекучести $\tau_{\text{н.ж}}$, и солидуса $\tau_{\text{затв}}$, а также распределение температур в потоке сплава в процессе заполнения полости формы.

При соответствующих условиях выполняли эксперименты по изготовлению отливок из сплава АК7ч при ЛВВ, ЛНД и ЛПрД, в которых в осевых точках сечения по высоте отливки и длине литника устанавливали спай хромель-алюмелевых термопар. По записанным температурным кривым охлаждения сплава определяли величины $\tau_{\text{ликв}}$, $\tau_{\text{н.ж}}$ и $\tau_{\text{затв}}$. Расчеты и эксперименты выполняли при нижнем центральном и боковом подводе сплава.

Как показали расчеты и натурные эксперименты, рассмотренные выше критерии направленности затвердевания при постоянной по высоте отливки толщине стенки не выполняются. Величины $\tau_{\text{затв}}$ и $\tau_{\text{н.ж}}$ по высоте отливки изменяются немонотонно. От низа отливки до ее термического центра они увеличиваются, а затем уменьшаются. Как показали сравнительные расчеты, термический центр отливки при расчетах без учета естественной конвекции ($\alpha_t = 0$) располагается на уровне $(0,5-0,6) H_{\text{отл}}$. Естественная конвекция существенно смещает термический центр отливки вверх до уровня $(0,75-0,85) H_{\text{отл}}$. Вследствие естественной конвекции термический центр отдалается от расположенного внизу питающего элемента (питателя). Это затрудняет организацию направленного затвердевания. Организация непрерывного питания отливки через литники без применения прибылей возможна лишь при технологичной конструкции отливки. Технологичность отливок, изготавливаемых при ЛРД, предполагает не только последовательное уменьшение толщин стенок по мере удаления от места подвода сплава, но и обеспечение необходимых минимальных уклонов стенок, называемых конусностью питания.

Для расчета конусности питания в диссертации выполнены решения краевых задач тепломассообмена при затвердевании отливок с разными уклонами стенок с учетом естественной конвекции. В результате обработки расчетных данных были получены расчетные формулы для разных способов подвода сплава. С целью проверки адекватности формул были выполнены эксперименты по изготовлению плоских отливок из сплава АК7ч и АЛ7-3Л в условиях ЛВВ и ЛНД. В экспериментах измеряли температуры по высоте отливки и определяли плотность темплетов, вырезанных из отливок, по методу гидростатического взвешивания. По значениям плотности оценивали пористость сплава по формуле $P = (\rho_{\text{пл}} - \rho_{\text{л}}) 100\% / \rho_{\text{л}}$, где $\rho_{\text{пл}}$ – плотность предварительно прокованного до постоянного значения плотности образца.

Как показали результаты экспериментов, при расчетных значениях конусности питания обеспечивается выполнение условий $\frac{\partial \tau_{\text{н.ж}}}{\partial y} < 0$ и $\frac{\partial \tau_{\text{затв}}}{\partial y} < 0$ и получение качественных отливок. При этом пористость сплава в отливках находится на уровне 0,5–2,0 %, что в 2–2,5 раза меньше, чем при обычном кокильном литье.

Назначение конусности питания в соответствии с полученными выше рекомендациями обеспечивает получение качественных отливок без усадочных дефектов лишь при непрерывном питании отливки через литники из металлопровода.

Для рассмотренных в гл.5 типов ЛПС можно выделить 3 основных типа для анализа тепловой работы ЛПС:

- нижний центральный подвод сплава;
- боковой подвод сплава;
- вертикально-щелевая ЛПС.

Для всех указанных типов были сформулированы краевые задачи процессов теплопереноса в системе «отливка–питатель–форма». Для ЛПС стояком в систему включали и стояк.

С целью получения формул для расчета геометрических параметров ЛПС, при которых обеспечивается выполнение приведенных выше условий направленности затвердевания, были выполнены машинные эксперименты по решению указанных краевых задач.

При соответствующих условиях были выполнены эксперименты по изготовлению отливок из сплава АК7ч с использованием разных типов ЛПС. В экспериментах определяли величины $\tau_{затв}$ и $\tau_{н.ж}$ по высоте отливки. В натурных экспериментах определяли также распределение пористости по высоте отливок. После обработки данных машинных экспериментов были получены формулы для расчета геометрических размеров ЛПС.

В диссертации разработана методика расчета размеров литников (их толщины и ширины). При рассредоточенном подводе получены формулы для расчета числа питателей по периметру отливки.

Как показали эксперименты по изготовлению отливок при ЛРД из сплава АК7ч, при расчетных значениях размеров литников обеспечивается монотонное увеличение величин $\tau_{затв}$ и $\tau_{н.ж}$ по длине литников по мере удаления от термического центра отливок. При этом в отливках отсутствовали усадочные дефекты, а пористость сплава находилась на уровне 0,5–1,7 %. При невыполнении условий в отливках обнаруживались усадочные дефекты в виде крупных пор и раковин. Эксперименты показали, что при ЛПрД вследствие действия повышенного (до 0,5 МПа) всестороннего газового давления обеспечивается снижение пористости отливок до 0,2–0,8 %.

Размеры ЛПС, определенные с точки зрения требования обеспечения непрерывного питания отливки через литники, должны быть согласованы с гидродинамическими требованиями, сформулированными в гл. 5.

В главе 7 на основе обобщения полученных в предыдущих главах формул и рекомендаций разработана автоматизированная система расчета технологических параметров изготовления отливок при ЛРД.

По введенным в ЭВМ исходным данным система позволяет рассчитать весь комплекс технологических параметров изготовления отливок:

- оптимальную продолжительность заливки формы;
- способ управления заливкой формы;

- значения площадей дросселирующих устройств при заполнении металлопровода и отдельных участков полости формы, а также моментов времени их переключения;
- значения газодинамических параметров процесса;
- размеры элементов литниково-питающей системы;
- тип кокильной краски в полости формы и в литниках и толщину кокильного покрытия.

При отсутствии термостабилизации формы система позволяет определить температуру нагрева формы перед первой заливкой, толщину стенки формы и степень оребрения ее наружной поверхности. Эти параметры обеспечивают стабильное получение отливок при заданном уровне механических свойств и параметров макро- и микроструктуры в процессе последовательного изготовления отливок на технологической установке. При этом разброс механических свойств не превышает 15–20%, а их уровень на 30–40% превышает требования стандарта.

Внедрение оптимизации параметров теплового режима формы обеспечило экономический эффект 94 тыс. руб. в ценах 1989 года (ориентировочно 1 млн руб. в современных ценах).

Разработанная автоматизированная система опробована при изготовлении 30 типовых промышленных отливок из номенклатуры предприятий «Уралтрансаш», «Курганмашзавод», «Уральский оптико-механический завод», «Уральский турбомоторный завод», а также в Уральском научно-исследовательском технологическом институте. Она принята к использованию на этих предприятиях, о чем имеются заключения и акты, приведенные в приложении к диссертации.

В процессе опробования и использования системы установлено, что в зависимости от отливки время, затрачиваемое на выполнение расчетов не превышает 5–15 минут, что значительно сокращает трудоемкость проектирования технологии. Расчетные параметры позволяют получать качественные отливки без длительной дорогостоящей доводки технологии. Применение предлагаемой системы позволяет на 10–15% повысить коэффициент использования металла в заготовке, снизить трудоемкость механической обработки, до 80–90% повысить выход годного, в 1,5–2 раза снизить пористость отливок. Ожидаемый экономический эффект от использования системы в расчете на освоение технологии производства одной отливки в зависимости от массы отливки составляет от 1000 до 10000 рублей.

Получено 5 свидетельств Роспатента об официальной регистрации и включении в государственный реестр разработанных в диссертации компьютерных программ.

Заключение

В соответствии с поставленной целью в диссертации решена научная проблема по разработке комплексной теории методов ЛРД и созданию научно обоснованной системы оптимальной организации технологических процессов

получения отливок методами ЛРД, позволяющей расширить сферу применения методов ЛРД, обеспечивающей получение качественных отливок сложной конфигурации с большими перепадами толщин стенок, повышение КИМ и выхода годного до 80% и более, резкое снижение затрат на проектирование и освоение технологии.

В работе проведены экспериментальные и промышленные исследования, а также математическое моделирование процессов формирования отливок при ЛРД, что позволило разработать научно обоснованные методики определения оптимальных значений технологических параметров.

Предложенная система организации технологии сводится к следующему:

- применение оптимального управления заливкой форм, сводящегося к реализации оптимального кусочно-линейного закона изменения разрежения или избыточного давления в камере машины, параметры которого определяются по разработанной в диссертации методике с учетом реальной конфигурации отливки;
- определение оптимальной продолжительности или скорости заливки, осуществляющееся с учетом специфики ЛРД, размеров и типа конфигурации изготавливаемых отливок, по разработанной в диссертации методике;
- определение параметров заливки тонкостенных отливок в соответствии с разработанной в диссертации методики расчета заполняемости форм сплавом;
- выбор типа литниково-питающих систем, обеспечивающих подвод сплава из металлопровода во все термические узлы отливки. Это позволяет исключить применение припайки и повысить до 80% и более выход годного;
- обеспечение технологичности отливок за счет реализации направленной к металлопроводу или к питателям минимальной конусности питания, рассчитываемой по разработанной в диссертации методике;
- применение разработанной в диссертации автоматизированной системы расчетов для определения оптимальных значений технологических параметров: скорости заливки и необходимого для ее обеспечения темпа изменения перепада давлений на расплав; параметров газовой системы для настройки системы оптимального управления заливкой форм; размеров и условий теплоизоляции литниково-питающей системы, при которых обеспечивается плавное, качественное заполнение форм сплавом и непрерывное питание отливки из тигля через металлопровод и литниковую систему; тепловых и геометрических параметров металлических форм, обеспечивающих высокую стабильность механических свойств полученных отливок.

Реализация указанной системы и предложенной организации технологии позволяет резко сократить расходы на ее проектирование и освоение, повысить выход годного, коэффициент использования металла и эксплуатационные свойства сплава, а также обеспечить получение качественных отливок в широком диапазоне перепадов толщин стенок (от 0,1 до 10 мм) и скоростей заливки (до 20 см/с).

По теме диссертации опубликованы 1 учебник и учебное пособие, 67 статей и докладов. Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Книги (учебники и учебные пособия)

1. Технология литейного производства: Учеб./Б.С. Чуркин, Э.Б. Гофман, С.Г.Майзель, А.В. Афонаскин, В.М. Миляев, А.Б. Чуркин, А.А.Филиппенков. – Екатеринбург, 2000. – 662 с.
2. Чуркин Б.С., Гофман Э.Б., Чуркин А.Б. Специальные методы литья: Учеб пособие для вузов.– Екатеринбург, 1992. – 127 с.

Статьи и доклады

3. Расчет литниковых систем при литье под регулируемым давлением/Б.С. Чуркин, Э.Б. Гофман, Г.П. Шумихин, А.Б. Чуркин//Литейное производство. №10. 1985.
4. Чуркин Б.С., Чуркин А.Б. Расчет оптимальных параметров заливки форм под регулируемым давлением//Литейное производство. №10. 1988. С.22–23.
5. Чуркин Б.С., Чуркин А.Б. Статистическое моделирование теплового режима металлических форм//Литейное производство. №10. 1990. С.22–23.
6. Чуркин А.Б., Гофман Э.Б., Шабалин А.Ю. Опыт проектирования технологии с помощью ЭВМ при литье под регулируемым давлением//Литейное производство. №10. 1990. С.20–21.
7. Чуркин А.Б., Чуркин Б.С. Оптимизация теплового режима кокилей для полых цилиндрических отливок//Известия вузов. Машиностроение. №6. 1991. С. 36–41.
8. Чуркин А.Б., Чуркин Б.С. Методика автоматизированного расчета тепловых и геометрических параметров металлических форм//Известия вузов. Машиностроение. №12. 1991. С. 86–88.
9. Чуркин Б.С., Чуркин А.Б. Оптимальные условия формирования отливок в металлических формах//Литейное производство. №2. 1994. С.30–31.
10. Чуркин А.Б., Чуркин Б.С., Клюев В.А. Статистический анализ надежности технологии изготовления отливок литьем под регулируемым газовым давлением//Совершенствование литейных процессов. Труды международной конференции литейщиков.– Екатеринбург: Изд-во УГТУ. С. 140–144.
11. Чуркин Б.С., Графман З.И., Чуркин А.Б. Статистическое моделирование технологических процессов в литейном производстве/Труды международной конференции литейщиков. – Липецк, 1989.
12. Оптимизация характера изменения перепада газового давления на расплав в процессе заполнения форм при литье под регулируемым давлением/А.Б. Чуркин, Б.С. Чуркин, Э.Б. Гофман, Ю.И. Категоренко// Литейное производство. №2. 2002. С.31–32.
13. Чуркин Б.С., Чуркин А.Б., Гофман Э.Б. Оптимальное управление заливкой форм при литье под регулируемым давлением. Беларусь. Минск//Литье и металлургия. №2. 2002.
14. Влияние перепада давлений на заполнение формы при литье под регулируемым давлением//А.Б. Чуркин, Б.С. Чуркин, Э.Б. Гофман, Ю.И. Категоренко//Литейное производство. №4 2002. С.15–17.
15. Чуркин А.Б. Расчет литниково-питающих систем при литье под регулируемым давлением//Литейное производство. №6. 2002 (приложение). С.3–5.

16. Об изменении избыточного давления в камере установки для литья под низким давлением/А.Б. Чуркин, Б.С. Чуркин, Э.Б. Гофман, Ю.И. Категоренко//Литейное производство. №6. 2002. С.33–35.

17. Чуркин А.Б. Система автоматизированных расчетов технологических параметров при литье под регулируемым давлением//Литейное производство. №7. 2002.– С. 27–29.

18. Чуркин Б.С., Чуркин А.Б., Гофман Э.Б. Оптимальное управление заполнением форм сплавом при литье под регулируемым давлением//Труды V съезда литейщиков России. – М., 2001. – С. 366–370.

19. Чуркин А.Б. Организация питания отливок при литье под регулируемым давлением//Труды VI съезда литейщиков России. – М., 2003. – С. 143–149.

20. Расширение сферы применения и повышение эффективности методов литья под регулируемым давлением/Б.С.Чуркин, А.Б. Чуркин, Э.Б. Гофман, Ю.И. Категоренко//Труды VI съезда литейщиков России. – М., 2003. – С. 170-174.

21. Чуркин А.Б. Эффективность применения автоматизированной системы расчетов технологических параметров изготовления отливок при литье под регулируемым давлением//Литейщик России. №9.2003. С.32–33.

22. Чуркин А.Б. Закономерности заполнения форм сплавом при литье под регулируемым давлением//Литейщик России. №11. 2003. С.13–16.

23. Чуркин А.Б. Направленное затвердевание отливок из алюминиевых сплавов при литье под регулируемым давлением//Литейное производство. №9 (приложение). 2003. С.6–8.

24. Чуркин А.Б., Гофман Э.Б., Карпов В.В. Оптимальная организация технологии изготовления отливок по пенополистироловым моделям вакуумным всасыванием//Литейное производство. №11. 2003. С.43.

25. Чуркин А.Б. Организация питания отливок при литье под регулируемым давлением//Литейное производство. №11. 2003. С.43.

26. Чуркин А.Б., Категоренко Ю.И. Управление заливкой форм при литье вакуумным всасыванием//Литейное производство. №12 (приложение). 2003. С.5–6.

27. Чуркин А.Б. Расчет литниково-питающих систем при литье под регулируемым давлением при подводе на двух уровнях//Литейщик России. №2. 2004. С. 18–20.

Авторские свидетельства

28. Чуркин А.Б., Чуркин Б.С. Свидетельство Роспатента №2003611605 об официальной регистрации компьютерной программы для ЭВМ «Proekttex». М., 4.07.2003.

29. Чуркин А.Б., Категоренко Ю.И., Гофман Э.Б. Свидетельство Роспатента №2003612274 об официальной регистрации компьютерной программы для ЭВМ «Proekt LVV». М., 18.08.2003.

30. Чуркин А.Б. Свидетельство Роспатента №2003612273 об официальной регистрации компьютерной программы для ЭВМ «LITN 1». М., 06.10.2003.

31. Чуркин А.Б. Свидетельство Роспатента №2003612271 об официальной регистрации компьютерной программы для ЭВМ «LITN 2». М., 06.10.2003.

32. Чуркин А.Б., Чуркин Б.С. Свидетельство Роспатента №2003612272 об официальной регистрации компьютерной программы для ЭВМ «SAPFORM». М., 06.10.2003.

Подписано в печать 08.09.2004. Формат 60х84/16.

Бумага для множ. Аппаратов. Усл. печ. л. 2,23 Уч.-изд. л. 2,2.

Тираж 100 экз.

Заказ № 208

Уральский государственный технический университет УГТУ-УПИ. 620002
Екатеринбург, ул. Мира, 19.

Отпечатано на ризографе Российского государственного профессионально-педагогического университета. 620012 Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11.

