

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

УДК 621.74.04/07:669.715.061.62

На правах рукописи

МОИСЕЕВ ЮРИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И СОЗДАНИЕ
ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЛИТЬЯ ПОД РЕГУЛИРУЕМЫМ ДАВЛЕНИЕМ
НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Специальность: 05.16.04 – Литейное производство

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени доктора
технических наук



Киев-1996

1997
ДВ 26.01
Работа выполнена в Физико-технологическом институте
металлов и сплавов Нац. АН Украины ім. В. Стефаника



00761073 (O)

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук,
профессор, заведующий кафедрой
Киевского политехнического
института

Ближ Олег
Михайлович

Доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник
Института проблем материалове-
дения НАН Украины, г. Киев

Ершов Геннадий
Степанович

Доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник
Физико-технологического инсти-
тута металлов и сплавов НАН
Украины, г. Киев

Шитко Владимир
Константинович

Ведущее предприятие:

Индустриальный институт, г. Луцк.

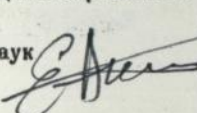
Защита состоится "27" февраля 1997 г. в 10⁰⁰ час

на заседании специализированного ученого совета Д.01.97.01 в
Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАН Украины по
адресу: 262080, ГСП, Киев-142, проспект Вернадского, 34/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-техно-
логического института металлов и сплавов НАН Украины.

Автореферат разослан "24" января 1997 г.

Ученый секретарь специализированного
ученого совета,
доктор технических наук


Е.Г. Афтандиянц

ОБЪЕДНЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ. Положительное влияние силового воздействия на процессы заполнения литейной формы и затвердевания отливки известно с давних пор и составляет принципиальную основу таких специальных способов литья, как автоклавное, литье под давлением прессующего поршня, литье под низким газовым давлением и др. Известно, что более 50% отливок из цветных металлов и сплавов изготавливают методами литья с использованием давления как внешнего силового фактора. Наряду с этим, интенсивно растущая потребность в сложных отливках с гарантированными однородными свойствами предъявляет высокие требования к производительности и стабильности используемых литейных технологических процессов. Этим требованиям не удовлетворяет ни технический уровень используемых литейных машин, ни широко используемое ручное управление режимами литья, опирающееся на квалификацию и личный опыт литейщика.

Содержание технологического процесса составляют две основные группы искомых параметров: статические параметры, характеризующие оптимально выбранные исходные данные и ограничения, и динамические, изменяющиеся в каждом цикле изготовления отливки. Основу реализуемых автоматически программ управления режимами литья составляют уравнения и экспериментальные зависимости, описывающие динамику заполнения литейной формы металлом и затвердевания отливки.

Для технологии получения отливок методами литья под давлением первостепенное значение имеет динамика изменения создающих давление сил. Роль давления как технологического фактора гораздо шире и сложнее его роли как термодинамического фактора, непосредственно влияющего на фазовые превращения. Именно физические особенности и практические возможности использования различных энергоносителей,

будь-то сжатый газ, электромагнитное поле или гидравлически прес-сующий поршень и определяют технологическую применимость различных схем использования давления при изготовлении отливок.

В данной диссертации систематизированы результаты исследований литейных процессов, а также опыт автора в разработке и освоении технологии и оборудования для изготовления отливок различными методами литья, использующими давление как внешний силовой фактор. Помимо самостоятельного практического значения, поскольку речь идет о новых технологиях и оборудовании, сравнительное сопоставление принципиальных схем и режимов изготовления отливок литьем под регулируемым давлением позволяет выявить ту рациональную основу, на которой может быть решена проблема создания универсальной аппаратуры управления литейными процессами, по крайней мере, для специальных способов литья.

Важнейший этап в формировании структуры и свойств затвердевающей отливки связан с жидко-твердым состоянием литейного сплава в интервале температур кристаллизации. Исследованию литейных процессов, протекающих в этом температурном интервале, посвящено огромное количество работ, но только в последние годы стали обращать внимание на необходимость изучения реологических свойств сплавов в жидко-твердом состоянии, предполагая использовать зависимость механических свойств деформируемой среды от динамики силового воздействия на эту среду. Первоначальные технологические опыты лишь выявили значительность и сложность этой проблемы в целом, подтвердив непригодность традиционных режимов изготовления отливок для их получения из жидко-твердого состояния.

Режимы литья под давлением, предполагая силовую обработку жидкого металла, также должны основываться на данных о реологических свойствах этого металла в различных его состояниях. В неявном виде

это имеет место при освоении технологии получения отливок литьем под регулируемым давлением и обобщении практического опыта, например, при создании стандартного ряда технологического оборудования. Однако, уже попытка нормализовать режимы подпрессовки при литье под давлением прессующего поршня оказываются безуспешными без фундаментального исследования реологических процессов, протекающих при прессовании жидко-твердого сплава.

Таким образом, практические запросы литейного производства все в большей мере требуют знаний о реологических свойствах материалов в различных состояниях. Систематическому исследованию этих свойств для алюминиевых сплавов, в связи с совершенствованием технологий получения отливок методами литья под регулируемым давлением, посвящена значительная часть настоящей диссертации.

Работа выполнена в Институте проблем литья Академии наук Украины /с 1995 г. - Физико-технологический институт металлов и сплавов/ в период 1979-1995 г.г. в рамках постановлений Президиума АН Украины и планов работ по новой технике Министерств тракторного и сельскохозяйственного машиностроения; авиационной промышленности; оборонной промышленности; тяжелого и транспортного машиностроения; станкостроительной и инструментальной промышленности; электротехнической промышленности.

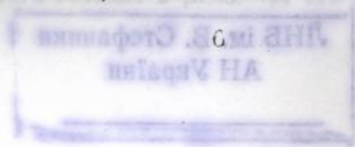
В постановке задачи исследований, их методическом обосновании, критическом обсуждении полученных результатов большую помощь автору оказали академик НАН Украины Шимов В.А. и член-корреспондент НАН Украины Борисов Г.И., а в проведении исследований и их практической реализации - сотрудники отделов новых методов литья, отдела автоматизации и конструкторские отделы Института проблем литья АН Украины, а также сотрудники металлургических служб и це-

ховые работники машиностроительных заводов, осваивавших новую технику. Автор выражает им искреннюю благодарность и признательность за оказанную помощь.

Автор, являясь инициатором, ответственным исполнителем и руководителем работ, принимал непосредственное участие в разработке принципиальных технологических схем и конструкций нового оборудования, их реализации на всех этапах проектно-конструкторских, опытно-технологических и внедренческих работ, а также лично разрабатывал научно-исследовательскую аппаратуру, проводил исследования реологических свойств и структур сплавов, динамических параметров различных литейных процессов. Новые экспериментальные данные, теоретические положения и практические рекомендации, представленные в диссертации, получены и сформулированы автором лично.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ. Основная цель работы заключается в исследовании и систематизации определяющих динамических параметров формирования структуры отливок, получаемых различными методами литья под давлением, и разработке на этой основе высокопроизводительных стабильных промышленных технологий и технологического оборудования. Для достижения этой цели необходимо решить следующие основные задачи:

- исследовать реологические свойства алюминиевых сплавов в интервале температур кристаллизации;
- исследовать динамику заполнения литейной формы жидким металлом при использовании в качестве внешних движущих сил различных энергоносителей;
- исследовать кинетику затвердевания отливок и особенности их структурообразования в условиях воздействия давлений различной физической природы;
- исследовать и оптимизировать режимы регулирования давления, обеспечивающих стабильность технологических процессов из-



готовления отливок;

- разработать, оптимизировать и реализовать конструкции новых универсальных машин литья под газовым, электромагнитным и механическим давлением прессующего поршня;
- разработать и промышленно освоить типовые технологические процессы изготовления отливок различной номенклатуры литьем под давлением прессующего поршня, газовым и электромагнитным давлением.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. На основе теоретического анализа дифференциальных уравнений, описывающих динамику исследуемых процессов, выбирали определяющие параметры и методами моделирования и экспериментально изучали влияние этих параметров на показатели качества процесса или отливки.

Методы исследования реологических свойств алюминиевых сплавов в интервале температур кристаллизации существенно зависят от преобладающего при заданной температуре механического свойства сплава /вязкости, пластичности или упругости/, поэтому по мере снижения температуры использовали методы ротационной вискозиметрии, сдвиговой деформации плоско-параллельными пластинами и пластичного деформирования сплава проникающим конусом. Непрерывная запись деформаций обеспечивала регистрацию всего диапазона деформирования, а возможность аппаратного изменения масштабов деформаций и времени позволяла выявлять характерные детали течения сплава под нагрузкой.

При исследовании динамики заполнения литейных форм жидким металлом, а также процессов магнито-динамических течений и циркуляций в каналах магнито-динамической литейной установки, наиболее эффективными оказались различные варианты пневмогидравлических измерений и датчиков, реагирующих на продвижение фронта потока, его скорость и расход воздуха из заполняемой металлом полости формы.

Наряду с этим, в ряде случаев использованы методы физического гидромоделирования процесса заливки формы и электрического моделирования по методу электро-тепловой аналогии процесса затвердевания металла в формах с различной теплоаккумулирующей способностью. При разработке программ автоматического управления режимами литья использовано электрическое моделирование элементов САУ с помощью микро-ЭВМ "Электроника-6С".

При исследовании кинетики кристаллизации и морфологических особенностей структурных составляющих сплавов в интервале температур кристаллизации использовали структурно-закалочный метод с металлографическим анализом структуры закаленных образцов.

В процессе выбора и оптимизации технологических режимов литья, разработки конструкций литейных машин и элементов систем управления режимами литья широко использовали натуральный эксперимент в лабораторных и промышленных условиях, с применением известных технологических проб, электронной измерительной техники и методов статистической обработки экспериментальных данных.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. Современными методами получены новые экспериментальные данные о реологических свойствах алюминиевых сплавов в интервале температур кристаллизации и установлены аналитические зависимости упругости, эффективной вязкости, пластичности и пластической прочности этих сплавов от температуры и соотношения жидкой и твердой фаз в этом диапазоне температур. Установлено, что по мере снижения температуры и увеличения количества твердой фазы происходит трансформация реологического состояния сплава от линейно-вязкого при содержании твердой фазы до 5% к нелинейно-вязкому при содержании твердой фазы от 5% до 10%, вязко-пластическому при содержании твердой фазы от 10% до 40-60%, вязко-пластически-упругому

с малопрочной твердообразной структурой при содержании твердой фазы от 40-60% до 90-95% и, наконец, к дилатантно вязко-пластично-упругому с твердообразной хрупкой структурой при содержании твердой фазы от 95% до 100%. Для каждого реологического состояния предложены механические модели и реологические уравнения, позволяющие рассчитывать режимы силовой обработки сплава при различных температурах и выбирать их в зависимости от целей этой обработки. Первые три состояния характеризуют сплав как структурированную жидкость, деформация которой может начинаться при как угодно малых нагрузках и для которой может быть построена полная реологическая кривая течения; два последних - как твердообразную структуру, деформация которой начинается лишь при нагрузках, превышающих определенное начальное значение, при этом малопрочные структуры позволяют построить полные реологические кривые течения, а хрупкие исключают эту возможность.

Установлено, что при содержании твердой фазы более 75% интенсивность повышения вязкости превышает интенсивность увеличения модуля упругости при сдвиге, что приводит к резкому увеличению периода релаксации напряжений и требует существенного ограничения допустимых скоростей деформирования.

Предложены новые реологические показатели технологичности алюминиевых литейных сплавов для специальных способов литья, такие как соотношение упругой, эластической и пластической деформации как показатель формируемости при жидко-твердом прессовании; разность между максимальной пластической вязкостью и гиньяльной эффективной вязкостью как показатель текучести.

При исследовании динамики заполнения литейных форм расплавом методом литья под низким давлением определены критические режимы, определяющие колебательность или аperiodичность потока металла.

Показана возможность использования в качестве параметра, характеризующего текущий уровень расплава в форме, текущего значения давления воздуха в форме. Исследована кинетика затвердевания отливок при литье под низким давлением и установлены закономерности интенсификации дендритной и эвтектической кристаллизации, приводящей к сокращению зоны затрудненного питания усадочных мест отливки и повышению ее плотности. Определены требования к статическим и динамическим характеристикам системы автоматического управления режимами литья под низким газовым давлением с учетом заданной стабильности технологических параметров.

Экспериментально исследована динамика развития напорного течения расплава в металлопроводе, циркуляционных и вихревых потоков жидкого металла в активной зоне, каналах и ванне оригинальной литейной магнетодинамической установки в зависимости от потребляемой мощности электромагнитных систем, режимов их включения и неоднородности магнитной индукции в полюсном зазоре напорного электромагнита.

Разработан и реализован алгоритм микрокомпьютерного варьирования и управления режимами литья под электромагнитным давлением.

Систематизированы и обобщены данные о расчетах и последовательности выбора оптимальных технологических параметров изготовления отливок литьем под давлением прессующего поршня. Определены области устойчивого и неустойчивого регулирования режима запрессовки металла в форму в зависимости от диапазона изменения температуры заливки металла и температуры прессформы. С учетом повышенных требований к стабильности скорости прессования при заливке сплава в жидко-твердом состоянии разработана прецизионная система стабилизации режима прессования и система стабилизации массы дозы для машины литья под давлением прессующим поршнем.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ. Определены реологические характеристики литейных сплавов системы $Al-Si$ в диапазоне температур затвердевания, что позволяет рассчитывать требуемые усилия и скорости прессования этих сплавов в жидко-твердом состоянии, оценивать технологичность сплавов применительно к силовым методам изготовления отливок и является основой дальнейшего совершенствования литейной технологии, включающей новые технологические приемы силового динамического воздействия на затвердевающую отливку.

Разработаны методики расчета основных технологических параметров изготовления отливок литьем под газовым, электромагнитным и поршневым давлением и создана аппаратура автоматического управления режимами литья.

Разработаны опытные образцы универсальных и специальных машин для изготовления отливок из алюминиевых сплавов литьем под низким газовым давлением, литьем под электромагнитным давлением, а также специальный комплекс автоматизированного оборудования для изготовления литьем под давлением целымолитых каркасов ступеней эскалаторов для метрополитена. Новые литейные машины расширяют парк высокопроизводительного литейного оборудования, оснащенного современными средствами управления технологическими процессами и обеспечивающего стабильность качества литых заготовок для машиностроения.

На задату выносятся следующие положения:

- методы и экспериментальная аппаратура для исследования реологических свойств алюминиевых сплавов в интервале температур кристаллизации, а также для изучения динамики потоков жидкого металла в литейной форме и каналах машин литья под газовым, электромагнитным и механическим давлением;

- закономерности изменения реологических свойств сплавов в интервале температур кристаллизации при изменении температуры сплава;
- закономерности и особенности динамики заполнения литейных форм жидким металлом и кинетики затвердевания отливок при использовании внешнего давления, создаваемого различными по физической природе энергоносителями;
- оптимальность технических характеристик и конструкции созданных в процессе исследований машин литья под низким газовым давлением, под электромагнитным давлением и под давлением прессующего поршня.

РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ. Проведенные исследования позволили разработать и реализовать на машиностроительных заводах ряд новых технологических процессов и литейных машин:

- процессы литья под низким газовым и электромагнитным давлением деталей специального назначения на Московских заводах "Авангард" и "Знамя";
- процесс заливки под низким давлением алюминия роторов специальных электродвигателей на предприятиях оборонной промышленности и роторов общепромышленных электродвигателей серии 4а мощностью до 50,0 кВт на Каменск-Уральском и Ново-Киевском электромашиностроительных заводах;
- процессы литья под низким давлением деталей тракторных двигателей на Челябинском тракторном заводе;
- систему стабилизации режимов литья под низким давлением на Заволжском моторном заводе;
- процесс литья под низким давлением корпусов фильтров на Уфимском моторном заводе;

- универсальные машины литья под низким давлением модели 32.0.067;
- специальные машины для заливки роторов электродвигателей модели АЛУР-3;
- опытный образец магнитодинамической литейной установки МДИ-1А;
- автоматизированный комплекс А-7111В для изготовления литьем под давлением каркасов ступеней эскалаторов для метрополитена.

Организован и оснащен новыми литейными машинами специальный литейный участок на заводе "Авангард" /г.Москва/ и специальный цех по производству цельчолитых каркасов ступеней эскалаторов на Красноярском заводе тяжелого машиностроения.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Материалы диссертации доложены и обсуждены на 12 научно-технических съездах, конференциях и семинарах.

ПУБЛИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ. По теме диссертации опубликовано 43 научных трудов, в том числе 7 без соавторов, и получено 41 авторское свидетельство на изобретения. Материалы диссертации вошли в справочник "Цветное литье", авторы Галдин Н.М., Чернега Д.Ф., Иванчук Д.Ф., Моисеев Ю.В., Чистяков В.Н.; М., Машиностроение, 1990, 412 с.

В работах [1, 18, 19, 20, 27] представлены методики и результаты экспериментальных исследований реологических свойств алюминиевых сплавов; в работах [2, 6, 7, 15, 21, 24, 28] - результаты исследований в области литья под низким газовым давлением; в работах [3, 10, 11] - литья под электромагнитным давлением; в работах [4, 13, 14, 30] - литья под давлением прессующего порошка; в работах [5, 8, 12, 17, 24] - в области создания конструкции новых литейных машин и систем автоматического управления режимами литья.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация изложена на 230 стр. машинописного текста; состоит из введения, пяти разделов с выводами по каждому разделу, заключения, приложения и содержит 215 рисунков, 36 таблиц и список использованных источников из 269 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В введении обоснована актуальность работы, сформулированы общие задачи совершенствования технологии изготовления отливок методами литья под регулируемым давлением и частные задачи оптимизации динамики воздействующих на жидкий и затвердевающий металл сил различной физической природы во взаимосвязи с реологическими свойствами сплавов в жидко-твердом состоянии. Изложена цель работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также представлены положения, выносимые на защиту, и общие сведения о публикациях и апробации работы.

РАЗДЕЛ I. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАВЛЕНИЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изготовление отливок методами литья под давлением связано с регулированием режимов заливки литейной формы расплавом и силовым воздействием на процесс затвердевания.

При заполнении литейной формы металлом основной задачей является регулирование расхода расплава в соответствии с известными ограничениями или технологическими требованиями. Расход определяется полем мгновенных скоростей в сечении потока, которое может быть

установлено из анализа динамики потока, описываемой уравнениями Навье-Стокса:

$$\rho \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = \rho \cdot \vec{F} - \text{grad } P + \mu \cdot \nabla^2 \vec{v} \quad /1/$$

где ρ - плотность жидкости;

\vec{v} - вектор мгновенных скоростей;

\vec{F} - вектор внешних сил;

μ - вязкость;

∇ - оператор Лапласа.

Уравнение /1/ должно быть дополнено уравнением неразрывности $[\text{div } \vec{v} = 0]$ и уравнением реологического состояния текучей среды:

$$\tau_{ij} = -P \cdot \delta_{ij} + \beta \cdot \dot{\epsilon}_{ij} + \gamma \cdot \dot{\epsilon}_{ik} \cdot \dot{\epsilon}_{kj} \quad /2/$$

где τ_{ij} - тензор напряжений;

$\dot{\epsilon}_{ij}$ - тензор скоростей деформации;

β, γ - скалярные функции главных инвариантов тензора скоростей деформации.

Уравнение /2/ при $\beta = 2\mu = \text{const}$ приводит к реологическому уравнению Ньютона для линейно вязкой среды:

$$\tau_{ij} = -P \cdot \delta_{ij} + 2\mu \cdot \dot{\epsilon}_{ij} \quad /3/$$

В технологии литейного производства, основанной на свободной гравитационной заливке перегретого металла в литейную форму, для расчета литниковых систем и режимов заливки достаточными оказываются интегральное решение уравнений Навье-Стокса в виде уравнения Бернулли, уравнение неразрывности и реологическое уравнение Ньютона с поправками на зависимость вязкости жидкого металла от температуры. Использование этих уравнений оправдано для изотропной одно-

родной жидкости. При охлаждении металлического расплава ниже температуры ликвидус и с возникновением макронеоднородной дисперсной структуры ситуация существенно изменяется.

Известно, что двухфазная твердо-жидкая текучая среда обнаруживает ряд новых физических свойств, таких как вязкоупругость, эластичность, пластическая прочность; течение по мере увеличения скорости деформации все в большей мере становится "стержневым"; сдвиговые деформации концентрируются в узкой пограничной области, а вязкость среды становится функцией скорости деформации. Это поведение двухфазной среды предполагает уравнение /2/, содержащее тензорные и скалярные нелинейности в слагаемых правой части уравнения, а экспериментально оно подтверждено для огромного класса органических и неорганических материалов в процессах, связанных с их технологической обработкой /полимеры, нефть, строительные материалы/.

Металлы и сплавы, претерпевая при охлаждении из жидкого состояния фазовые превращения, представляют собой сложную реологическую среду с непрерывно изменяющимися свойствами. Эта сложность обусловлена тем, что в интервале температур кристаллизации, по мере снижения температуры, изменяется соотношение жидкой и твердой фаз, изменяется состав и свойства как дисперсионной жидкой среды, так и дисперсной твердой фазы, а также изменяются морфологические формы твердой фазы. До недавнего времени исследования реологических свойств сплавов в интервале температур кристаллизации были ограничены, что обусловлено как отсутствием методических разработок, так и сложностью экспериментирования с неустойчивыми двухфазными системами при высоких температурах. Наибольшую известность получили работы Прохорова Н.И. и Новикова И.И., связанные с определением механической прочности сплавов в интервале температур кристаллизации в связи с проблемами горячеломкости отливок. Чрезвычайно плодотворными оказа-

лись методические разработки школы П. П. Рабиндера в области физико-химической механики материалов, использованные в исследованиях горячеломкости сплавов Балвиничем Г. Ф. и Каширцевым Л. П., а также в исследованиях механики затвердевания литейных сплавов Тимофеевым Г. И. За рубежом интерес к реологическим исследованиям возрос в последние годы в связи с разработкой принципов получения отливок из жидко-твердого состояния штамповкой и литьем под давлением пресующего порошка.

Анализ обобщенных уравнений механики сплошных сред, известных данных о реологическом поведении различных двухфазных материалов и результатов специальных исследований в области литейных технологий указывают, что литейный сплав в интервале температур кристаллизации как текучая среда обладает особыми реологическими свойствами, которые следует учитывать при выборе режимов заливки и технологической обработки сплава в твердо-жидком состоянии.

Весьма существенным оказывается влияние давления на процесс затвердевания отливки. Внимание исследователей, занимающихся проблемами затвердевания, привлекают процессы, протекающие в твердо-жидкой зоне отливки, а также характеристики и свойства этой зоны в различных аспектах.

Известные различия в кинетике затвердевания сплавов с узким и широким интервалом температур кристаллизации связаны с изменениями характеристик зоны твердо-жидкого состояния и соответствующими изменениями кинетики газоусадочных процессов, морфологии кристаллизующихся фаз, ликвиции примесей, условий питания затвердевающих зон отливки жидким металлом, и в конечном итоге — с выбором технологических режимов изготовления и качеством отливок.

Размеры зоны жидко-твердого состояния определяются условиями теплообмена в двухфазной области /соответствующими градиентами

температуры/ и зависят от коэффициента распределения компонентов сплава, а темп кристаллизации /производная от содержания твердой фазы от температуры/ нелинейным образом изменяется в интервале температур кристаллизации, сохраняя повышенные значения вблизи температуры ликвидус и уменьшаясь в области температуры солидус, то есть по сечению двухфазной зоны твердая фаза распределена неравномерно.

Наконец, морфология и дисперсность твердой фазы, в частности расстояние между ветвями первого порядка и между ветвями второго порядка, являются сложной функцией скорости роста твердой фазы и градиента температуры в жидкой фазе, управляя которыми можно изменять коэффициент проницаемости двухфазной зоны, что существенно важно для процессов питания отливки при затвердевании. С изменениями протяженности, структуры и механических свойств твердо-жидкой зоны отливки связано в конечном счете формирование эксплуатационных свойств отливки.

Различными исследованиями установлено, что наилучшая корреляция для алюминиевых сплавов наблюдается между прочностными характеристиками и индексом затвердевания, представляющим собой отношение продолжительности затвердевания отливки к среднему температурному градиенту: первый параметр определяет морфологию затвердевающей фазы, а второй - ширину зоны жидко-твердого состояния. Индекс затвердевания позволяет удовлетворительно прогнозировать прочностные свойства отливки именно благодаря тому обстоятельству, что отражает важнейшие структурные характеристики твердо-жидкой зоны.

Давление изменяет условия теплообмена на фронте затвердевания и на контактной поверхности отливка-форма, влияет на расходные характеристики питания усадочных зон отливки жидким металлом и может существенно повлиять на характеристики твердо-жидкой зоны.

Обобщая вышесказанное, можно сказать, что реологические характеристики сплава в двухфазном состоянии определяют особенности его механического поведения при течении и деформировании, а структурные характеристики двухфазной зоны, отражающие морфологическую и кинетическую приспособляемость процесса затвердевания к интенсивности теплоотвода и силовое поле отливки непосредственно связаны с формированием прочностных свойств.

Оптимизация режимов приложения давления в различных технологических схемах изготовления отливок и выявление зависимостей и параметров, управление которыми обеспечивает стабильное качество отливок, составили предмет исследований в настоящей работе и послужили основой для создания новых литейных машин.

В работе приведен анализ характеристик, преимуществ и недостатков используемых в настоящее время машин литья под давлением, под низким газовым давлением, а также известных образцов машин литья под электромагнитным давлением. Приведена сравнительная оценка технологических возможностей различных способов литья и охарактеризованы важнейшие направления исследований и опытно-конструкторских работ, направленных на дальнейшее совершенствование технологии и оборудования для изготовления отливок методами литья под регулируемым давлением.

РАЗДЕЛ 2. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР

КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

В работе изложены теоретические основы механики деформирования и течения сплошных сред: общие представления о вязкости, упругости и пластичности материалов и функциях реологического состояния сплошных сред, устанавливающих связь между компонентами тензоров нап-

рижений и деформаций, а также их производными по времени. Приведен анализ механических моделей реологических сред на основе упругого тела Гука, вязкой жидкости Ньютона и пластического тела Сен-Венана, последовательное и параллельное соединение которых позволяет условно замечать реальную среду идеализированной.

Наиболее полно процесс деформирования материала характеризуют реологические кривые течения, описывающие зависимость скорости деформаций от величины действующих напряжений сдвига как в области неразрушенной структуры, так и в области переходной и практически полностью разрушенной структуры. Для многих материалов построить полную реологическую кривую течения невозможно, поскольку разрыв сплошности наступает до выхода на участок стационарного течения.

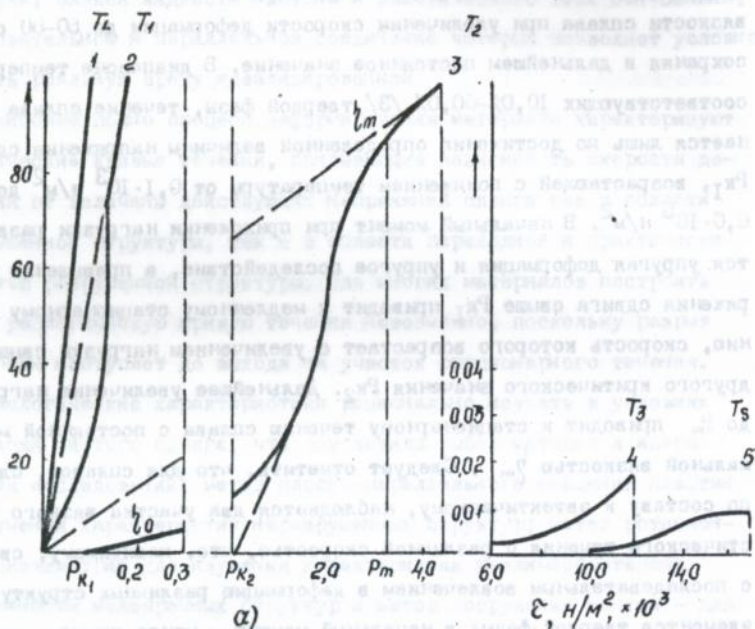
Реологические характеристики рационально изучать в условиях деформации чистого сдвига, что обусловило выбор методов и аппаратуры для исследований: метод плоско-параллельного смещения пластин при изучении характеристик неразрушенных структур; метод ротационной вискозиметрии для изучения характеристик различной степени разрушенности малопрочных структур и метод погружения конуса — для прочных твердообразных структур. Объектом исследования были доэвтектические, эвтектические и заэвтектические сплавы $Al-Si$ с содержанием кремния от 0,1% до 16,5%, а также промышленные сплавы системы $Al-Si$ типа $Al2$, $Al4$, $Al9$, $Al32$, $Al25$ и некоторые другие.

Содержание твердой фазы при различных температурах определяли структурно-закалочным методом путем металлографического анализа структур и оценочно расчетным методом по диаграмме состояния $Al-Si$.

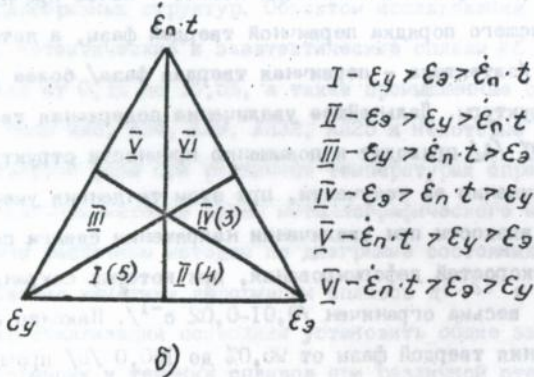
Исследования кинетики деформации сплавов $Al-Si$ в интервале температур кристаллизации позволили установить общие закономерности развития деформации и течения сплавов при различной степени их структурированности, определяемой содержанием и формой твердой фазы.

Установлено, что при содержании твердой фазы до 5,0% /1/, рис. 1а/ расплав подчиняется известным законам линейно-вязкого течения. Увеличение твердой фазы до 10,0% /2/ приводит к нелинейному изменению вязкости сплава при увеличении скорости деформации до $50-80 \text{ с}^{-1}$, сохраняя в дальнейшем постоянное значение. В диапазоне температур, соответствующих 10,0%-60,0% /3/ твердой фазы, течение сплава начинается лишь по достижению определенной величины напряжения сдвига R_{K1} , возрастающей с понижением температуры от $0,1 \cdot 10^3 \text{ н/м}^2$ до $6,0 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$. В начальный момент при приложении нагрузки развивается упругая деформация и упругое последствие, а превышение напряжения сдвига свыше R_{K1} приводит к медленному стационарному течению, скорость которого возрастает с увеличением нагрузки свыше другого критического значения R_{K2} . Дальнейшее увеличение нагрузки до R_m приводит к стационарному течению сплава с постоянной минимальной вязкостью η_m . Следует отметить, что для сплавов, близких по составу к эвтектическому, наблюдается два участка вязкого пластического течения с различной скоростью, что, повидимому, связано с последовательным вовлечением в деформацию различных структурных элементов твердой фазы: в начальный момент - менее прочных дендритных ветвей высшего порядка первичной твердой фазы, а затем - агрегатированных /эвтектика - первичная твердая фаза/ более прочных элементов структуры. Дальнейшее увеличение содержания твердой фазы до 90,0%-95,0% /4/ приводит к повышению прочности структуры и интенсивному снижению ее текучести, при этом тенденция уменьшения пластической вязкости при увеличении напряжения сдвига сохраняется, но диапазон скоростей деформирования, при которых сохраняется сплошность сплава, весьма ограничен /0,01-0,02 с^{-1} /. Наконец при увеличении содержания твердой фазы от 95,0% до 100,0 /5/ прочность структуры повышается, вязкость пластического течения с увеличением

Характерные кривые течения и деформационные области сплава $Al - 3,19\% Si$ в интервале температур кристаллизации



а)



б)

Рис. 1

- а/ Кривые течения; $T_L = 644^\circ C$; $T_I = 640^\circ C$; $T_2 = 634^\circ C$;
 $T_3 = 635^\circ C$; $T_5 = 577^\circ C$;
 б/ Характерные деформационные области.

нагрузки возрастает, сплав становится хрупким и разрушается уже при низких скоростях деформации.

Таким образом, в интервале температур кристаллизации можно выделить по крайней мере пять реологически отличающихся состояний сплава: /рис.2/ линейно-вязкое вблизи температуры ликвидус при содержании твердой фазы до 5,0% /I/; нелинейно/вязкое при содержании твердой фазы до 10,0% /2/; вязко-пластично-упругое с возможностью построения полной реологической кривой течения, характерной для структурированных жидкостей, при содержании твердой фазы до 60,0% /3/; упруго-вязко-пластичное с малопрочной твердообразной структурой и с ограниченным диапазоном допустимых скоростей деформации при содержании твердой фазы до 90,0-95,0% /4/; дилатантное вязко-упругое с твердообразной хрупкой структурой при содержании твердой фазы от 95,0% до 100% /5/. В структурированном состоянии /последние три из описанных выше/ происходит практически одновременное развитие трех видов деформации: упругой ϵ_y , вязко-упругой /эластической/ ϵ_z и пластической ϵ_n , соотношения которых могут характеризовать деформационную способность сплава при различных температурах /рис. 1б/. Хрупкое разрушение и плохая деформируемость характерны для I и III состояний; хорошая текучесть и допустимость высоких скоростей деформации характерны для II и IV состояний; удовлетворительная текучесть при низких допустимых скоростях деформации присущи V и VI состояниям. Увеличение содержания твердой фазы в сплаве от 40,0% до 100,0% приводит к последовательному переходу сплава из состояния 3 /IV/ в состояние 4 /II/ и состояние 5 /I/ при соответствующем изменении его деформационной способности.

Реологическую среду характеризуют три фундаментальных свойства: упругость, вязкость и пластичность. В работе приведены экспериментальные данные о температурной зависимости модуля упругости G_1 ,

Геологические состояния сплавов $\pm l - \delta_2$
в интервале температур кристаллизации

Упрощенные модели:

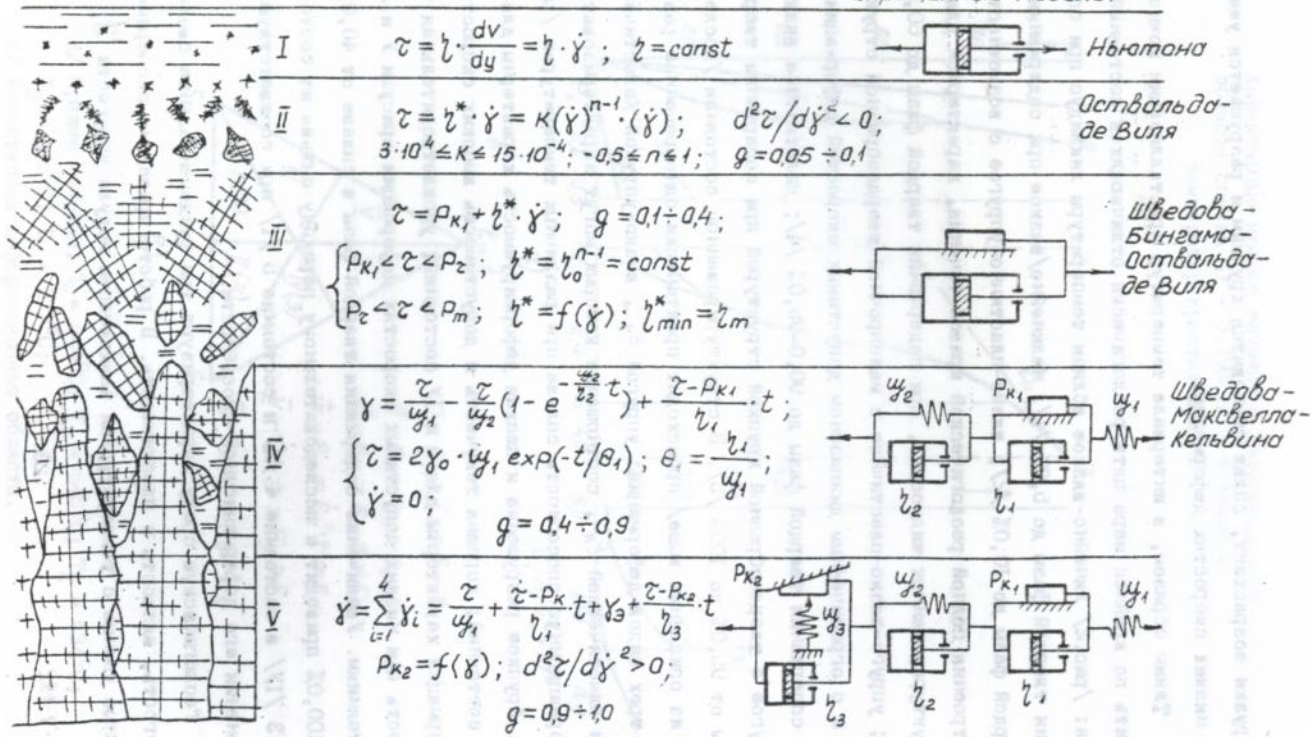


Рис. 2

24

модуля упругого последствия ω_{Σ} , эффективной вязкости η_{Σ} и пластической вязкости η_0 , статического предела текучести R_{Σ} и пластической прочности R_{Σ} исследуемых Al-Si сплавов в интервале температур кристаллизации. Модули ω_{Σ} и ω_{Σ} монотонно возрастает при понижении температуры, при этом их абсолютные значения в области температуры солидус для доэвтектических сплавов возрастают с увеличением содержания кремния, а в заэвтектической области вновь понижаются. Интенсивность роста модуля упругости ω_{Σ} резко возрастает при увеличении содержания твердой фазы до 90%-95% и практически скачкообразно /на один - два порядка/ - при понижении температуры на 2-3°C ниже температуры солидус. Скорость роста модуля упругого последствия ω_{Σ} в области температур солидус начинает уменьшаться, уступая скорости роста модуля ω_{Σ} , что отражает общую тенденцию повышения прочности и хрупкости структуры при снижении содержания жидкой фазы до нуля. Обработка экспериментальных результатов /по методу наименьших квадратов/ дает для температур, соответствующих 10-70% твердой фазы, аналитическую зависимость модуля упругости ω_{Σ} исследуемых сплавов от приведенной температуры Θ в виде:

$$\omega_{\Sigma} = 1,46 \cdot 10^6 \cdot e^{-5,9 \cdot \Theta}, \text{ н/м}^2 \quad /4/$$

где $\Theta = \frac{T - T_3}{T_4 - T_3}$

T - текущая температура;

T_4 - температура ликвидус;

T_3 - температура солидус.

Динамическая вязкость η_{Σ} исследуемых сплавов возрастает на три порядка при увеличении содержания твердой фазы до 60,0%, при этом увеличение скорости деформации приводит к снижению вязкости. В диапазоне содержания твердой фазы 10-60% зависимость динамической вязкости от приведенной температуры Θ и скорости деформации $\dot{\epsilon}$

может быть описано эмпирическим уравнением:

$$b_{\text{зр}} = A_1 \cdot A_2 \cdot \sqrt{\frac{\Theta^{n_1}}{\dot{\epsilon}^{m_1}}} \quad /5/$$

где $A_1 = 0,25 + 0,50 \cdot 2,0 \leq \kappa \leq 4,0$;

$$A_2 = 3,0 \cdot 10^{-3} + 3,0 \cdot 10^{-4} \cdot m, \quad 0,5 \leq m \leq 1,5.$$

Статический предел текучести $R_{\text{кI}}$ возрастает в интервале температур кристаллизации от $0,01 \cdot 10^4$ н/м² до $8,0 \cdot 10^5$ н/м², а пластическая прочность $R_{\text{м}}$ — от $0,1 \cdot 10^5$ н/м² до $8,5 \cdot 10^6$ н/м², при этом верхнее значение по абсолютной величине уменьшается с увеличением содержания кремния в сплаве /для сплава $\text{Al} - 16,5\% \text{Si}$: $R_{\text{кI}}^{\text{max}}$ составляет $0,6 \cdot 10^5$ н/м², а $R_{\text{м}}^{\text{max}}$ — $43,8$ н/м²/. Последнее обстоятельство обусловлено увеличением содержания эвтектики в доэвтектических сплавах и морфологическими изменениями твердой фазы в заэвтектических сплавах: и эвтектика, и избыточный кремний кристаллизуются в компактной форме, слабо сопротивляясь в присутствии жидкой фазы нагрузке.

Методика исследования реологических свойств по методу Вейлера-Рейбиндера /плоско-параллельное смещение пластины/ имеет одно важное для исследования затвердевания сплавов преимущество: она позволяет экспериментально оценивать кинетику линейной усадки в процессе затвердевания. Исследованиями установлено, что усадка в интервале температур кристаллизации развивается неравномерно: скорость усадки максимальна при выделении первичной α -твердой фазы, уменьшается на этапе эвтектической кристаллизации и вновь возрастает на завершающем этапе затвердевания, когда доля жидкой фазы становится незначительной. При прочих равных условиях скорость усадки сплава тем выше, чем меньше содержания в нем эвтектики. Как впервые показано Балашидиным Г.Ф. и Каширцевым Л.П., а также подтверждено реологическими исследованиями автора настоящей работы, за меру деформационной способности сплава в температурной интервале хрупкости следует

принимать общую или предельную упругую деформацию, а не остаточное удлинение, при этом технологическая прочность сплава /в деформациях или напряжениях/ достигает критического значения лишь в условиях интенсификации и локализации деформаций. При торможении усадки скорость деформации сплава тем выше, чем шире диапазон температур его кристаллизации и чем меньше содержание эвтектики; локализация же деформаций в отливке связана с неравномерностью усадки, обусловленной конфигурацией отливки и условиями теплообмена между отливкой и литейной формой. Реологическое поведение сплава в условиях заторможенной усадки может приводить к горячеломкости, если превышена критическая скорость деформации. Кинетический фактор оказывается решающим при литье тонкостенных отливок из высокопрочных сплавов, затвердевающих в широком диапазоне температур. Рассредоточение усадки за счет рационального расположения питателей, стабилизация температуры прессформы, уменьшение разностенности отливки и ряд других технологических приемов являются мерами согласования реологических свойств сплавов в интервале температур кристаллизации с допустимыми нагрузками и скоростью деформации отливки, возникающими при ее затвердевании.

Установленные реологические характеристики сплавов в диапазоне температур кристаллизации позволяют выбирать усилия и мощность прессования и перемешивания, обоснованно управлять процессами фильтрационного и суспензионного питания отливки и выбирать режимы обработки, связанные с динамическими силовыми воздействиями на затвердевающую отливку.

РАЗДЕЛ 3. ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВОК ЛИТЬЕМ ПОД НИЗКИМ ГАЗОВЫМ
ДАВЛЕНИЕМ

Режимы изготовления отливок литьем под низким газовым давлением определяются двумя группами основных параметров: к первой группе относятся параметры, определяющие условия заполнения литейной формы металлом, ко второй – условия затвердевания.

Динамика движения линейно-вязкой жидкости описывается дифференциальным уравнением /I/ второго порядка, при этом объектом регулирования является уровень металла в тракте "металлопровод-литейная форма", а регулируемое звено может быть колебательным или апериодическим, что зависит от соотношения коэффициентов перед второй и первой производными при записи уравнения /I/ в канонической форме:

$$h \cdot \frac{1}{g} \cdot \frac{d^2 h}{dt^2} + \frac{1}{2g} \cdot \xi \left(\frac{dh}{dt} \right)^2 + h = \frac{1}{\gamma} (P_n - P_\phi) \quad /I/$$

где h – текущее значение уровня металла;

ξ – коэффициент гидравлического сопротивления;

P_n – давление газа в печи;

P_ϕ – давление воздуха в форме.

Минимизация первых двух слагаемых в /I/ определяет условия, при которых динамические колебания уровня будут также минимальными:

$$h_k = \frac{\xi}{2 - \xi} \cdot t^{\frac{2 - \xi}{2}} \quad /II/$$

где h_k – отклонение уровня от статического, определяемого по условию $P = \gamma h$;

Установлено, что критическим является условие $\xi \geq 2$. Этому условию

удовлетворяет простановка в металлопроводе дросселирующей вставки при соотношении площади поперечного сечения вставки к площади металлопровода равном или меньше 0,64, что позволяет достаточно просто выбрать размер дросселирующей вставки для исключения колебательности потока.

Выбранная допустимая скорость расплава в критическом сечении литейной формы определится скоростью изменения давления газа P_n в печи и зависит от соответствующего изменения давления P_f воздуха в форме. Последнее обстоятельство имеет существенное значение, по сравнению с кокильным литьем, поскольку значительное избыточное давление вынуждает исключать зазоры по плоскости смыкания прессформы и соответственно возрастает требования к вентиляции литейной формы и к работоспособности вент. В частности, площадь сечения вент должна быть увеличена в 2-3 раза по сравнению с кокильным литьем. Наряду с этим, динамика изменения давления воздуха в литейной форме несет информацию о движении металла, в частности, о его уровне. Сопоставляя расходные характеристики жидкого металла и воздуха, можно показать, что давление воздуха в форме P_f зависит от скорости изменения давления газа в печи и текущего уровня металла "h" в форме по условию:

$$P_f = K_1 \cdot F_f(h) \cdot \frac{dP_n}{dt} \quad /3/$$

где $F_f(h)$ - площадь поперечного сечения формы, соответствующая текущему уровню металла в ней;

K_1 - постоянный коэффициент.

Синхронная запись давления газа в печи и давления воздуха в форме при изготовлении отливок различной номенклатуры показывает, что характерные изменения площади поперечного сечения отливки отслежи-

ваются на кривой изменения давления воздуха в форме в виде перегибов и нелинейностей, стабильно воспроизводимых в каждом цикле изготовления отливки. Таким образом, измеряемые значения давления воздуха в форме могут быть использованы для контроля режима заполнения формы металлом или корректировки программы заливки, учитывающей понижение уровня расплава в печи. В последнем случае заданному фиксированному значению давления воздуха в форме будет соответствовать момент начала заливки, то-есть начальный момент стабильной повторяемости заданной программы заливки. Альтернативное техническое решение предусматривает установку у входа в литейную форму сигнализатора уровня металла, дающего сигнал на включение программы заливки.

Экспериментальное исследование кинетики затвердевания цилиндрических отливок из сплава АЛ9 при литье в кокиль и под низким газовым давлением позволило установить ряд особенностей в развитии различных этапов и зон затвердевания. Наиболее существенным при литье под низким давлением является сокращение зоны дендритной кристаллизации и уменьшение общего времени затвердевания отливки. Опыты по исследованию затвердевания отливок с различным содержанием водорода показали, что с увеличением содержания водорода интенсивность затвердевания отливки уменьшается. Это может быть связано с выделением избыточного водорода на фронте затвердевания и образованием своеобразной зоны повышенного теплового сопротивления. В условиях литья под низким давлением выделение микропузырьков водорода затрудняется и соответственно не находит развития зона повышенного теплового сопротивления. Наряду с этим, при направленном затвердевании развиваются конвективные потоки, интенсифицирующие теплообмен на фронте затвердевания и сокращается ширина зоны жидкотвердого состояния /рис.3/. Чем интенсивнее потоки, тем выше дина-

мическое давление P_g и тем глубже зона разрушения жидко-твердой зоны с неравномерно распределенной по ее сечению прочностью R_{K1} . Область естественной конвекции ограничена полостью литейной формы и металлопровода, но принудительное перемешивание может вовлечь в конвективный процесс и жидкий металл раздаточной печи. В этом случае появляется дополнительная возможность управления процессом затвердевания за счет изменения градиента температур у фронта затвердевания со стороны расплава.

Жидко-твердая зона в отливке представляет собой пропитанную жидкостью пористую среду с переменной туликовой и транзитной пористостью. Расходные характеристики транзитной части жидко-твердой зоны определяются скоростью объемной усадки при затвердевании остаточной жидкости, а дефицит металла компенсируется за счет капиллярных сил и внешнего давления. Компенсация усадки гидравлически изолированных участков, представляющих собой туликовую пористость, возможна лишь путем деформирования сетки твердой фазы. Сокращение зоны жидко-твердого состояния улучшает условия фильтрационного питания, уменьшает долю туликовых участков и толщину деформируемой сетки твердой фазы, что приводит к повышению однородности и плотности отливки. В технологических режимах изготовления отливок литьем под низким давлением управление процессами в твердо-жидкой зоне отливки возможно путем варьирования температуры расплава, направленности затвердевания, давления и технологических выдержек. Увеличение градиента температуры интенсифицирует естественную конвекцию, поэтому следует поддерживать постоянно высокую температуру в зоне стыковки металлопровода с литейной формой, обеспечивать направленность затвердевания от периферии отливки к металлопроводу, обеспечивать рассредоточенное питание и усадку отливки с учетом возможного развития конвективных потоков, минимизировать технологическую вы-

держку /при изготовлении отливок с песчаными стержнями/ при минимально допустимом давлении или исключать ее при литье в кокиль, а также использовать динамическую подпрессовку отливки в процессе ее затвердевания.

Полученные выводы были проверены и подтверждены при освоении технологии изготовления отливок различной номенклатуры литьем под низким давлением.

В работе приведены результаты технологических исследований по выбору режимов изготовления из алюминиевых сплавов массивных толстостенных отливок /обойма насоса ИШ-100-2-06 из сплава "Алькусин-Д", затвердевающего в широком интервале температур/, тонкостенных отливок /корпус масляного фильтра из сплава АЛ32/ и разностенных /роторы электродвигателей специального и общепромышленного применения, заливаемые алюминием различных марок/. Выполненные технологические исследования позволили определить также требования к динамике и стабильности технологических параметров изготовления отливок литьем под низким газовым давлением; разработать специальные элементы системы автоматического управления режимами литья, стабилизирующие программу управления /сигнализатор уровня металла, стабилизатор давления газа и индикатор последовательности и времени заполнения литейной формы металлом/, а также создать два типа машин литья под низким давлением: универсальную для литья под низким давлением малогабаритных фасонных отливок из алюминиевых сплавов модели З2.0.067 и специальную модели АЛУР-3 для заливки алюминием роторов электродвигателей серии 4А И80-4А250.

РАЗДЕЛ 4. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ЛИТЬЯ И РАЗРАБОТКА
АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕЙНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ОТЛИВОК ЛИТЬЕМ ПОД ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ДАВЛЕНИЕМ

Уравнения Навье–Стокса [1] для условий магнито-гидродинамических течений электропроводящей жидкости должны быть дополнены слагаемым, соответствующим электромагнитной силе, возникающей при взаимодействии индукционно наведенного в короткозамкнутом витке тока с поперечным магнитным полем:

$$\vec{F}_3 = \left| \vec{\delta}_r \times \vec{B} \right| \quad /9/$$

где $\vec{\delta}_r$ - вектор плотности тока;

\vec{B} - вектор индукции поперечного магнитного поля,

а также уравнениями электродинамики Максвелла и уравнением энергетического баланса. Решение этих уравнений для частного случая плоско-параллельного движения жидкости в канале прямоугольного сечения позволяет определить скорость потока и напор как функцию произведения величин наведенного тока $J_{\text{н}}$ и индукции B , а также числа Гартмана, характеризующего соотношение электромагнитных сил и сил вязкости. С увеличением числа Гартмана сопротивление движению электропроводящей жидкости в поперечном магнитном поле возрастает, а профиль относительных мгновенных скоростей по сечению потока становится все более пологим. Регулирование напора и скорости движения электропроводящей жидкости возможно путем изменения силы тока или магнитной индукции в автономных электромагнитных системах /индукторе и катушке силового электромагнита/, согласовывания их по фазе при заданной частоте питающего переменного тока, при этом крайние эффекты, неоднородность плотности тока и индукции способствуют

развитию зон вихревых и циркуляционных движений в расплаве и снижают устойчивость ламинарного режима.

Исследования, выполненные на опытной образце магнитодинамической литейной установки, позволили оптимизировать электрические характеристики основных электромагнитных систем /индуктора и силового электромагнита/ в холостых и рабочих режимах, а также тепло-энергетические характеристики опытной установки в целом как плавно-раздаточной печи. Наряду с этим была изучена динамика циркуляционных потоков и вихрей в каналах и ванне печи и динамика изменения напорных характеристик при различных режимах включения индуктора и электромагнита. Роль циркуляционных потоков и вихрей неоднородна: с одной стороны они способствуют интенсификации теплообмена и выравниванию температуры в каналах и ванне печи, с другой стороны приводят к нерегулируемому росту местных гидравлических сопротивлений, турбулизации потока и возникновению локальных участков пониженного давления как зон инжекции воздуха из футеровки печи. Особенно интенсивное развитие вихрей наблюдается в активной зоне электромагнитного насоса, что обусловлено как неоднородностью магнитной индукции, так и краевыми эффектами, связанными сопряжением этой зоны с металлопроводом.

Изменяя интенсивность распределения магнитной индукции по высоте и ширине активной зоны можно регулировать интенсивность циркуляции расплава по высоте металлопровода или замыкать эту циркуляцию в пределах активной зоны, превращая подводимую электромагнитную энергию в энергию вихрей с перегревом металла за счет выделения Джоулева тепла.

Регулирование циркуляции расплава по высоте металлопровода позволяет управлять процессом затвердевания отливки /рис. 3б/ по схеме, описанной выше в разделе 3 автореферата, и является одним из

важнейших достоинств магнитодинамической литейной установки.

Существенно важное значение имеет не только динамическое воздействие струи конвективного потока на малопрочный фронт зоны затвердевания отливки, но и изменения температурного градиента в жидкой фазе у поверхности раздела жидкой и твердой фаз. Поскольку скорость затвердевания определяется разностью тепловых потоков в твердой и жидкой зонах отливки по условию:

$$\lambda_s \cdot \omega_s - \lambda_L \cdot \omega_L = \rho_s \cdot Q \cdot R \quad /10/$$

где λ_s, λ_L - коэффициенты теплопроводности твердой и жидкой фаз;

ρ_s - плотность твердого металла;

ω_s, ω_L - температурные градиенты в твердой и жидкой зонах у фронта затвердевания;

Q - удельная теплота кристаллизации;

R - скорость роста твердой фазы,

то изменения ω_s и ω_L можно регулировать и ширину зоны жидко-твердого состояния, и скорость затвердевания.

Второй из упомянутых выше режимов циркуляции является нежелательным. С этим режимом связаны инжекция и замешивание воздуха из футеровки печи в расплав с последующим окислением металла и образованием металлической "пены"; перегрев металла; ошлаковывание стенок канала и изменение размеров активной зоны, критично влияющих как на абсолютное значение и направленность приведенной суммарной электромагнитной силы, так и на ее градиенты по сечению активной зоны.

Исследование динамики изменения напорных характеристик при различных режимах включения электромагнитных систем показало, что в процессе заливки и выдержки металла в форме под электромагнитным давлением наблюдается колебательность гидравлической системы с пе-

ременными амплитудой и частотой как результат сложения свободных собственных колебаний переменного столба жидкого металла, случайных колебаний жидкого металла в каналах индукционной печи и вынужденных колебаний металла в активной зоне вследствие периодического изменения действующей электромагнитной силы. При включении электромагнитных систем длительность переходного процесса не превышает 0,01 с, поэтому переключение режимов в процессе заливки с запаздыванием 0,02-0,03 с приводит к дополнительной колебательности. Моделирование колебательности на микро-ЭВМ "Электроника-60" позволило определить условия, исключаящие низкочастотные составляющие колебательности, отрицательно влияющие на режимы литья. Эти условия предусматривают повышение быстродействия регулирующих и исполнительных органов и увеличение инерционности объекта регулирования за счет повышения его гидравлического сопротивления.

Исследования позволили разработать магнитодинамическую литейную установку типа МДЛ-1А-0,25, включающую индукционную плавильно-раздаточную печь полезной емкостью /по *АЕ* / 250 кг; автоматический кокильный станок с гидравлическим приводом и манипулятором для удаления отливок; специальный источник электропитания на базе трехфазного трансформатора; микропроцессорную систему автоматического управления режимами литья на основе управляющей микро-ЭВМ "Электроника-60". Система управления обеспечивает пооперационную ручную и автоматическую работу установки в трех основных режимах: плавление и хранение жидкого металла при заданной температуре; отладка режимов литья; изготовление отливок в автоматическом режиме по заданной программе. Испытания установки в условиях литейного цеха машиностроительного завода ММЗ "Авангард" подтвердили ее работоспособность, а также надежность микропроцессорной системы управления режимами литья.

РАЗДЕЛ 5. ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ
И СПЕЦИАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦЕЛЬНОЛИТЫХ КАРКАСОВ СТУПЕНЕЙ
ЭСКАЛАТОВ МЕТРОПОЛИТЕНА ЛИТЬЕМ ПОД ДАВЛЕНИЕМ
ПРЕССУЮЩЕГО ПОРШНЯ

Режимы заполнения литевой формы жидким металлом при литье под давлением прессующего поршня определяются динамикой движения пресспоршня. В процессе прессования можно выделить четыре основные фазы, последовательно сменяющие друг друга: медленное движение пресспоршня до момента перекрытия заливочного окна пресскамеры /1/; ускоренное движение с вытеснением воздуха из пресскамеры, 100% наполнением пресскамеры металлом и начальным заполнением литникового канала и питателей /2/; быстрая запрессовка жидкого металла в полость формы до момента ее заполнения /3/; подпрессовка металла в процессе затвердевания отливки /4/.

Важнейшей фазой прессования является третья, на которой происходит заполнение полости формы металлом. В практике литья под давлением прессующего поршня используют три основных режима заполнения формы металлом: ламинарный, сплошной турбулентный и дисперсный, а также переходные между ними, чаще всего - турбулентно-дисперсный. Критическая скорость впуска металла в форму, ограничиваемая условием ламинарности потока, обычно не превышает 0,5 м/с и может быть увеличена лишь за счет повышения вязкости расплава и заливки сплава в жидко-твердом состоянии. Однако, по условиям теплообмена и максимально допустимого времени заполнения формы металлом требуемые скорости впуска превышают критические /из условия ламинарности потока/ и режим заливки становится турбулентным, при этом существенное значение имеет соотношение толщины питателя и толщины стенки

отливки: чем меньше это соотношение, тем меньше значение критической скорости впуска. Для алюминиевых сплавов диапазон скоростей впуска, соответствующих турбулентному режиму, составляет 0,5-20,0 м/с. При скоростях впуска, превышающих 20-25 м/с, наблюдается заполнение формы струей дисперсного мелкораспыленного металла; уплотняемого по мере роста давления в камере прессования.

Пористость отливок как при турбулентном, так и при дисперсном режимах заливки, достаточно высока, однако размер пор и неоднородность их рассеяния при дисперсном режиме существенно меньше. Максимально допустимые скорости впуска для алюминиевых сплавов не превышает 50 м/с: высокие скорости впуска обеспечивают хорошее качество поверхности и наружных зон отливки, но снижают герметичность и плотность внутренних; низкие скорости способствуют уплотнению внутренних зон, но ухудшают качество поверхности. Повышение скорости впуска свыше 50 м/с приводит к интенсивному смыву смазки, локальному перегреву прессформы и уменьшению срока ее эксплуатации.

Важнейшее значение имеет стабилизация устойчивости впускаемой струи металла и сохранение сплошности потока, каким бы он ни был по своей структуре - ламинарным, турбулентным или дисперсным. Устойчивость струи повышается с уменьшением ее длины и с повышением вязкости расплава, поэтому заливка в жидко-твердом состоянии позволяет использовать более высокие скорости прессования. Однако, имеются ограничения как в выборе соотношения жидкой и твердой фаз, так и в выборе допустимой скорости прессования. Расчеты из условий теплового баланса показывают, что с увеличением доли твердой фазы до 50% допустимое время заполнения формы расплавом снижается до 0,001-0,005 с, что в рамках элементарных расчетов приводит к скорости впуска 200-300 м/с. При такой скорости впуска заметное значение приобретает перегрев расплава за счет диссипации механической энергии и перерасп-

ределения жидкой и твердой фаз по сечению потока, что изменяет структуру и свойства расплава и приведет к неустойчивости сплошной струи металла. Увеличить допустимое время заполнения формы металлом до значений, соответствующих реальным скоростям впуска, можно путем повышения рабочей температуры прессформы, однако, при этом повышаются требования к стабильности поддержания этой температуры.

В работе приведен анализ тепловых режимов литья, роль циклического чередования заливок в распределении температуры по толщине прессформы и поддержании баланса между поступающим в прессформу теплом и отводимым, а также значение градиентов температуры по высоте и толщине прессформы при литье эвтектических сплавов и сплавов, затвердевающих в широком интервале температур. Последняя, четвертая фаза прессования связана с силовым воздействием на затвердевающую отливку. В момент окончания заполнения формы металлом наблюдается гидравлический удар, снижающий точность размеров и качество отливки. Необходим определенный запас деформационной способности сплава для демпфирования гидравлического удара и подпрессовки отливки. При литье под давлением прессующего поршня этот запас определяется избыточным содержанием газов в расплаве и усредненным модулем упругости жидко-твердого сплава, а скорость подпрессовки — длительностью продвижения фронта затвердевания от периферии отливки к питателю. Увеличение скорости впуска увеличивает запас деформационной способности сплава, но эффективность подпрессовки будет зависеть от стабильности дозы металла и рационального выбора начального момента подпрессовки.

Анализ различных методов дозирования жидкого металла свидетельствует, что наименьшую погрешность дозы можно получить при весовом дозировании металла. Совмещение пневматической раздаточной пещи со взвешивающим устройством позволяет эффективно автоматизировать весь

процесс дозирования. Для снижения погрешности весового дозирования исследовали инерционность процесса отсечки при сливе металла из раздаточной печи в ковш весового дозатора и ввели упреждение, учитывающее динамику наполнения ковша. Промышленные испытания системы показали, что погрешность дозирования металла не превышает 1,5%.

Измерение и стабилизация массы дозы позволяют стабилизировать и режим прессования металла, в частности, рационально определять моменты включения 3 и 4 фазы прессования, однозначно связанные с фактической массой дозы и текущей координатой движения пресспоршня. Разработана универсальная самоадаптирующаяся система управления режимом прессования, измеряющая текущую координату движущегося пресспоршня и корректирующая момент включения 3 и 4 фазы прессования путем анализа величины и знака отклонения фактической массы дозы от заданной. Система обеспечивает также стабилизацию скорости прессования на технологически наиболее важной 3 фазе путем измерения времени прохождения пресспоршней базового пути, сравнения его с заданным временем и выдачи сигнала открытия или закрытия регулирующего дросселя цилиндра прессования, пропорционального величине и знаку отклонения.

Результаты исследований были использованы при разработке технологии изготовления литьем под давлением прессующего поршня ступеней эскалаторов метрополитена и создании автоматизированного комплекса оборудования для реализации этой технологии.

Комплекс разработанного автоматизированного оборудования включает машину литья под давлением с усилием заклипирования прессформы 3500 тс и скоростью прессования до 0,0 м/с; манипулятор для извлечения и удаления отливки; пневмораздаточную печь с весовым дозатором; термостатирующее устройство для регулирования по двенадцати контурам температуры 30-тонной прессформы; систему контроля и регулирования

технологических параметров и управления режимами работы комплекса в целом. Оборудование изготовлено заводом Сиблитмаш /г.Новосибирск/, смонтировано и испытано на специализированном литейной участке Красноярского завода тяжелых эскалаторов. Опытная партия отливок испытана на станции метрополитена "Рыбацкая" /г.С.-Петербург/. Испытания подтвердили их работоспособность и показали, что цельнолитые ступени в 5-6 раз превышают по надежности и запасу эксплуатационной прочности сборно-сварные и обеспечивают повышенную безопасность эскалатора.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны методики, аппаратура и исследованы реологические свойства сплавов $Al-Si$ в интервале температур кристаллизации.
2. Установлено, что модули упругости при сдвиге, эффективная и пластическая вязкость, условный статический и динамический пределы текучести, а также пластическая прочность сплавов $Al-Si$ интенсивно и монотонно возрастают в степенной зависимости на несколько порядков при понижении температуры расплава от температуры ликвидус до температуры солидус. Интенсивность роста пластической вязкости резко возрастает при содержании твердой фазы более 60%, что приводит к увеличению периода релаксации напряжений и снижению допустимых скоростей деформации по мере снижения температуры расплава. Полная реологическая кривая течения литейных сплавов с выходом на конечный литейный участок может быть построена только для температурной области, соответствующей содержанию твердой фазы не более 60%. При более высоком содержании твердой фазы с увеличением действующих напряжений наблюдается нарушение сплошности потока.
3. В интервале температур кристаллизации можно выделить пять основных реологических состояний сплавов $Al-Si$, соответствующих из-

вестным модельным представлениям реологических сред: линейно-вязкое ньютоновское при содержании твердой фазы до 5%; нелинейно-вязкое ньютоновское при содержании твердой фазы от 5% до 10%; вязко-пластическое шведовское при содержании твердой фазы от 10% до 60%; вязко-пластично-упругое с малопрочной твердообразной структурой при содержании твердой фазы от 60% до 90-95%; дилатантно вязко-пластично-упругое с твердообразной хрупкой структурой при содержании твердой фазы более 90-95%. Непрерывность перехода из одного реологического состояния в другое, температурная неустойчивость структуры в интервале температур кристаллизации и зависимость ее морфологических характеристик от степени деформации сплава являются характерными особенностями литейных жидко-твердых сплавов как специфических реологических сред.

4. Экспериментально исследована динамика заполнения литейной формы жидким металлом при литье под низким давлением. Определены критические режимы заливки и требования к динамике изменения давления газа в печи. Исследованы особенности затвердевания отливок при литье под низким давлением и определены требования к системе управления режимами литья с учетом стабильности технологического процесса. Разработаны технологические процессы изготовления литьем под низким давлением тонкостенных фасонных отливок различной номенклатуры, отливок гидроаппаратуры с толщиной стенки до 50 мм, а также процессы заливки короткозамкнутых роторов микроэлектродвигателей и общепромышленных электродвигателей мощностью до 50 кВт. Разработаны универсальная малогабаритная машина литья под низким давлением фасонных отливок из алюминиевых сплавов и специальная машина для заливки под низким давлением роторов электродвигателей.

5. Проведен анализ определяющих уравнений гидродинамики течений электропроводящих жидкостей в электромагнитных полях различной интен-

сивности и предложена конструкция литейной магнитогидродинамической установки для изготовления отливок из алюминиевых сплавов. Исследованы и оптимизированы энергетические и напорные характеристики установки. Исследованы циркуляционные и вихревые потоки жидкого металла в активной зоне, каналах и ванне печи в зависимости от мощности электромагнитных систем. Разработана микрокомпьютерная система управления режимами работы магнитодинамической литейной установки, обеспечивающая автоматическое выполнение цикловой программы работы установки, слежение и поддержание требуемой температуры расплава и варьирование режимами литья. Разработан и испытан в заводских условиях опытно-промышленный образец магнитодинамической литейной установки МДЛ-0,25-1А.

С. Выполнен анализ динамики заполнения литейной формы жидким металлом при литье под давлением. Показано определяющее значение допустимого времени заполнения формы металлом при выборе динамики прессования и неустойчивость этого параметра при снижении температуры заливки металла ниже температуры ликвидус. Определен диапазон допустимых колебаний массы дозы и скорости прессования, как наиболее критичных при стабилизации технологического процесса. Разработана система весового дозирования и стабилизации скорости прессования на базе прецизионного измерителя текущей координаты движущегося поршня, весового дозатора и устройств, регулирующих расход гидравлической жидкости при прессовании. Разработана технология изготовления литьем под давлением цельнолитых ступеней эскалаторов метрополитена. Разработана специальная автоматизированная машина литья под давлением модели А/IIIВ с усилием заширания прессформ 3500 тс для изготовления цельнолитых ступеней эскалаторов. На базе Красноярского завода тяжелых экскаваторов организован литейный участок для производства ступеней.

Материалы диссертации доложены и обсуждены на Всесоюзных научно-технических съездах литейщиков /Минск, 1978; Волгоград, 1983/, научно-технических конференциях: Автоматизация и прогрессивная технология литья под давлением /Москва, 1984/; Состояние и перспективы создания высокопроизводительного литейного оборудования /Москва, 1987/; Автоматизация литейных процессов /Киев, 1984/; Прогрессивная технология изготовления отливок из черных и цветных сплавов /Чебоксары, 1986/; Методы и средства контроля технологических процессов литья /Москва, 1993/; Прогрессивная технология повышения качества отливок из цветных сплавов /Киев, 1978/; Прогрессивная технология электромашиностроения /Тбилиси, 1972/; Всесоюзной конференции по литью под низким регулируемым давлением /Киев, 1988/ и семинарах по перспективам развития методов литья под регулируемым давлением /Киев, 1979, 1981/.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО

В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Моисеев Ю.В. Реологические свойства алюминиевых сплавов в интервале температур кристаллизации //Процессы литья, 1992, вып. 5, с. 12-18.
2. Моисеев Ю.В. Управление литейными процессами. Литье под низким давлением //Процессы литья, 1993, 13, с. 88-95.
3. Моисеев Ю.В. Управление литейными процессами. Литье под электромагнитным давлением //Процессы литья, 1994, № 2, с. 91-96.
4. Моисеев Ю.В. Управление литейными процессами. Литье под давлением //Процессы литья, 1995, № 2, с. 32-39.
5. Моисеев Ю.В. Состояние и основные тенденции автоматизации специальных способов литья //в сб. "Автоматизация специальных способов литья, Киев, ИИЛ, 1987, с. 3-8.

6. Моисеев Ю.В. Автоматизация литейных процессов. Киев, 1981, с.25.
7. Моисеев Ю.В. Управление литейными процессами. Литье с направленным затвердеванием //Процессы литья, 1993, № 4, с.43-48.
8. Галдин Н.М., Чернега Д.Ф., Иванчук Д.Ф., Моисеев Ю.В., Чистяков В.И. Цветное литье /справочник/.М., Машиностроение, 1990, с.412.
9. Моисеев Ю.В., Слободянюк В.О., Колобков В.Ф., Лойко А.Ф. Литье под низким давлением тонкостенных деталей //Литейное производство, 1978, № II, с.18.
10. Моисеев Ю.В., Молчанов Ф.В., Есько В.М. и др. Выбор параметров заливки под низким давлением короткозамкнутых роторов микроэлектродвигателей //Технология электротехнического производства, 1976, № 6, с.2-5.
11. Моисеев Ю.В., Пуцаловский А.Д., Стриковский Д.Л. Исследование динамики потоков жидкого металла в ванне и каналах установки МДЛ-1А //Процессы литья, 1990, вып.2, с.66-70.
12. Моисеев Ю.В., Пуцаловский А.Д., Стриковский Д.Л. К вопросу о математической модели гидравлической системы установки МДЛ-1А// в сб. "Интенсификация литейных технологий", Киев, 1989, с.67-70.
13. Моисеев Ю.В., Цужайло Л.П., Шурко В.К. и др. Разработка конструкции установки литья под электромагнитным давлением // в сб. "МГД в литейном производстве и металлургии", Киев, 1984, с.66-72.
14. Моисеев Ю.В., Гершков О.А. Технологическая подготовка производства литьем под давлением цельнолитых каркасов ступеней эскалаторов // в сб. "Автоматизация и прогрессивная технология литья под давлением", Москва, МДТЛ, 1984, с.59-63.
15. Моисеев Ю.В., Мамышев В.А., Соколовская Л.А. Оценка контролируемых параметров нестационарного температурного поля прессформ литья под давлением //в сб. "Контроль литейных процессов, формовочных материалов и качества отливок, Киев, Знание, 1993, с.19-20.

16. Моисеев Ю.В., Пухальский Н.П. и др. Литье под низким давлением облой насоса НШ-100 //Литейное производство, 1979, № 3, с. 19.
17. Чернега Д.Ф., Иваницук Д.Ф., Моисеев Ю.В. Прогрессивная технология повысила качества отливок из цветных сплавов. Киев, Знання, 1978, с.25.
18. Борисов Г.П., Моисеев Ю.В., Наривский А.В., Мацкуд А.И. Пластическая прочность алюминиевых сплавов в интервале температур кристаллизации, Киев, ИШ, 1976, с.8.
19. Наривский А.В., Моисеев Ю.В., Борисов Г.П. Эффективная вязкость алюминиевых сплавов АЛ9 и АЛ2 в интервале кристаллизации. Литейное производство, 1976, № 5, с.15-16.
20. Наривский А.В., Борисов Г.П., Моисеев Ю.В., Ефимов В.А. Исследование параметров фильтрационного питания алюминиевых сплавов в период затвердевания //Доклады АН УССР, серия А, 1977, № 2, с.157-161.
21. Бельский Д.А., Борисов Г.П., Моисеев Ю.В. О кинетике затвердевания сплавов при литье под низким давлением //в сб. "Новое в точном литье", Киев, ИШ, 1972, с.133-137.
22. Борисов Г.П., Моисеев Ю.В., Головаченко А.П., Наривский А.В., Дубинко В.Х. Исследование эффективности влияния избыточного давления на процесс формирования отливок из сплава АЛ9 // в сб. "Новое в литье с противодавлением", ИРБ, София, 1978, с.58-65.
23. Исаячев Н.П., Моисеев Ю.В., Стома Э.Ф. Исследование и выбор гидродинамических режимов заливки под низким давлением короткозамкнутых роторов электродвигателей //в сб. "Автоматизация и механизация процессов литья", Киев, Наукова думка, 1976, вып. 4, стр.22-31.
24. Антонов В.А., Кокошко А.Ф., Черепелица Г.Е., Борисов Г.П., Моисеев Ю.В. Типоразмерный ряд оборудования для заливки роторов

электродвигателей // Электротехническая промышленность, 1978, вып. 4, с. I-5.

25. Моисеев Ю.В., Пухальский Н.П., Ласовецкий В.Я., Прокудин Р.А. Получение отливок "Корпус фильтра" литьем под низким давлением. Литейное производство, 1984, № 7, с.33.
26. Пухальский Н.П., Моисеев Ю.В. Получение фасонных отливок без литниковых остатков // в сб. "Прогрессивная технология изготовления форм и стержней", Чебоксары, ДИП, 1980, с.15.
27. Наривский А.В., Борисов Г.П., Моисеев Ю.В. Реологические свойства алюминиевых сплавов в интервале температур кристаллизации в сб. "Усовершенствование процессов литья фасонных отливок", Киев, ИЛ, 1976, с.54-57.
28. Беденький Д.М., Борисов Г.П., Моисеев Ю.В. Влияние низкого давления на свойства и структуру заэвтектических силуминов, Литейное производство, 1971, № II, с.11-12.
29. Ефимов В.А., Борисов Г.П., Моисеев Ю.В. и др. О влиянии режимов литья с противодавлением на свойства отливок из алюминиевых сплавов // в сб. "Новое в литье с противодавлением", НРЬ, София, 1975, с.13-24/.
30. Моисеев Ю.В., Малышев В.А., Соколовская Л.А. О компьютерном прогнозировании термических характеристик рабочего слоя прессформ из легированной стали // в сб. "Легирование, структура и свойства упрочненных сталей", Киев, Знание, 1983, с.30-31.

По теме диссертации получены авторские свидетельства на изобретения за №№: 464501; 628994; 297426; 325093; 378417; 400417; 539684; 553953; 621459; 632476; 623645; 604616; 697252; 707088; 728933; 725797; 725798; 791450; 809957; 821054; 831216; 850288; 897394; 900970; 933215; 931276; 952428; 933228; 933229; 900969; 899261; 930455; 944779; 1419801; 1224188; 1547942; 1359069; 1435336; 1633332; 2014040; 1533737.

АННОТАЦИЯ

Моисеев Ю.В. Совершенствование технологии и создание оборудования для литья под регулируемым давлением на основе исследования реологических свойств алюминиевых сплавов

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.04 "Литейное производство". Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, г.Киев, 1997 г.

Защищается 48 научных работ и 41 авторское свидетельство, которые содержат результаты исследований реологических свойств алюминий-кремниевых сплавов в интервале температур кристаллизации, технологических исследований режимов изготовления отливок под низким газовым давлением, литьем под электромагнитным давлением и литьем под давлением прессующего поршня и конструкторских разработок по созданию новых литейных машин.

Ключевые слова: литье, реология, технология литья, литейные машины.

АННОТАЦІЯ

Моїсєєв Ю.В. Удосконалення технології і створення устаткування для лиття під регульованим тиском на основі дослідження реологічних властивостей алюмінієвих сплавів

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук по спеціальності 05.16.04 "Ливарне виробництво". Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м.Київ, 1997 р.

AB 36.929