

на правах рукописи

МОНАСТЫРСКИЙ Валерий Петрович

**РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ
КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ОТЛИВОК С НАПРАВЛЕННОЙ И
РАВНООСНОЙ СТРУКТУРОЙ**

Специальность 05.16.04. Литейное производство

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва 2014

Работа выполнена в Московском государственном машиностроительном университете (МАМИ).

Официальные оппоненты:
Доктор технических наук,

Доктор технических наук,

Доктор технических наук,

Ведущая организация

Защита состоится _____ 2014 года в _____ на заседании
диссертационного совета _____
в _____
по адресу: _____.

С диссертацией можно ознакомиться в .

Автореферат разослан _____ 2014 г.

Общая характеристика работы

Актуальность. Диссертация посвящена научно-технической проблеме совершенствования технологии изготовления отливок ответственного назначения, а также сокращения затрат на разработку технологии и выпуск первого комплекта отливок для опытных изделий новой техники. Актуальность этой проблемы постоянно возрастает в связи с ростом цен на металл, вспомогательные материалы и электроэнергию при одновременном стремлении к сокращению себестоимости продукции. Одним из аспектов решения этой проблемы является замена эмпирических методов разработки литейной технологии методами компьютерного моделирования. В настоящее время нарастающими темпами идет формирование единого виртуального пространства, охватывающего конструкторскую разработку и производство опытных изделий. Вслед за внедрением CAD систем, все большее число предприятий проявляет интерес к программному обеспечению, применяемому для разработки технологических процессов. Растущие вычислительные мощности современных компьютеров делают возможным численное решение задач тепло- и массопереноса при кристаллизации отливки во все более общей постановке, приближающейся к реальным производственным условиям.

Применение направленной кристаллизации (НК) для получения отливок со столбчатой или монокристаллической структурой является одним из наиболее эффективных средств достижения высоких служебных характеристик лопаток ГТД. Несовершенство режимов НК приводит к возникновению дефектов макро- и микроструктуры отливок, отрицательно сказывается на механических свойствах получаемых отливок и снижает эффективность применения этого технологического процесса. Исследование условий и особенностей формирования направленной и монокристаллической структуры, разработка методов ее получения, в том числе в зонах с резким изменением геометрических размеров, является актуальной задачей, тесно связанной с созданием газотурбинных двигателей нового поколения.

Большой вклад в разработку научных основ формирования структуры и дефектов отливок внесли Г.Ф.Баландин, В.А.Журавлев, В.Т.Борисов, Иванцов Г.П., A.F.Giamei, W.Kurz, P.R.Sahm, M.Rappaz, C.Beckermann и др. В научных трудах этих ученых разработаны фундаментальные вопросы тепло и массопереноса в двухфазной зоне отливки и определено общее направление развития теории кристаллизации металлического слитка. Разработанный на этой основе математический аппарат позволил построить математические модели, разработать алгоритмы и программное обеспечение для моделирования литейных процессов. Созданные коммерческие программные продукты (ProCAST, LVMFlow, Flow3D, MAGMASoft и СКМ «Полигон») удовлетворили потребности большей части производителей отливок для машиностроения, нефтегазовой, автомобильной промышленности и товаров народного потребления.

Инженерные методы расчета конструкции литейного блока на основе аналитических решений системы уравнений баланса для тепловых узлов получили развитие в работах представителей научных школ А.И. Вейника, Б.Б. Гуляева, Г.Ф.Баландина, В.С.Моисеева и А.А.Неуструева. Значительный вклад в развитие теории и практики этих методов внесли А.Ф.Смыков, Э.Л.Кац, М.Д.Тихомиров и др.

Созданные ими методики расчета литниково-питающих систем, методические пособия, рекомендации для промышленности и программные модули для систем САПР решают задачу проектирования технологии получения литой заготовки, в то время как, прямые методы математического моделирования, реализованные в перечисленных выше программных продуктах, призваны заменить опытные плавки компьютерным моделированием и дать прогноз качества отливки.

Присущие современным моделям упрощенные представления о механизмах формирования таких дефектов, как усадочная пористость и усадочная раковина, делают затруднительным адекватный количественный прогноз качества отливки и существенно ограничивают возможность

применения этого программного обеспечения в производстве деталей ответственного назначения. Развитие научных представлений о формировании усадочных дефектов является актуальной задачей для высокотехнологичного литейного производства таких отливок, как рабочие и сопловые лопатки, а также ряд других деталей авиационных двигателей (ГТД) и наземных газотурбинных установок (ГТУ).

Эффективное применение методов компьютерного моделирования в опытном и серийном литейном производстве невозможно без научно обоснованной методологии проектирования процессов литья. В практическом отношении решение этой задачи позволяет в несколько раз сократить сроки освоения производства опытных отливок, эффективно применять современные технологии подготовки производства, объективно оценивать технологичность отливок и качество принятых технологических решений. С точки зрения экологии происходит сокращение безвозвратных потерь энергии и материалов, уменьшение вредного воздействия на окружающую среду и человека.

Цель и задачи работы.

Целью настоящей работы является улучшение качества литых заготовок для ответственных деталей ГТД путем обоснованного выбора параметров технологического процесса, а также сокращение затрат на его разработку на основании обобщения и развития научных представлений о процессе направленной кристаллизации.

Для достижения этой цели поставлены следующие научные и технологические задачи:

1. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса направленной кристаллизации отливок сложной формы. Установление взаимосвязи между тепловыми условиями на фронте роста, макро- и микроструктурой отливки и технологическими параметрами процесса.
2. Разработка метода обоснованного выбора режима направленной кристаллизации, обеспечивающего получение требуемой структуры по всей длине лопатки ГТД.

3. Обобщение и развитие научных представлений о процессе формирования усадочных дефектов в отливках с равноосной и направленной структурой. Разработка математических моделей формирования усадочной раковины и усадочной макро- и микро пористости и их численная реализация.
4. Разработка методологии применения математического моделирования при проектировании технологических процессов изготовления литых заготовок деталей ответственного назначения для ГТД и ГТУ в условиях опытного производства.
5. Разработка и исследование технологии получения литых заготовок с равноосной и направленной структурой для деталей ГТД и ГТУ из никелевых жаропрочных сплавов. Внедрение технологии в производство.

Объект и предмет исследований.

Объектом исследований являются отливки из жаропрочных сплавов на основе никеля ЖС6У, ЖС6Ф, ЖС26, ЖС32, а также коррозионностойких жаропрочных сплавов ЧС70, ЧС88У и ЧС104, применяемых для получения литых заготовок ответственных деталей ГТД и ГТУ, в том числе рабочих и сопловых лопаток.

Предметом исследований является условия кристаллизации, структура и дефекты отливок, получаемых методом литья по выплавляемым моделям, технологические процессы получения отливок с направленной и равноосной структурой.

Экспериментальная часть работы выполнялась в ФГУП ВИАМ, в литейных цехах ГП НПКТ «Зоря»-«Машпроект» и ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют». Выполненные в диссертации научные и практические разработки внедрены в литейное производство ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют» и отражены в производственных инструкциях, технологических указаниях, отчетах и рекомендациях.

Научная новизна.

1. Установлены закономерности влияния параметров технологического процесса на тепловые условия направленной кристаллизации при

радиационном и конвективном охлаждении формы (в металлическом расплаве). Теоретически определены и экспериментально подтверждены области формирования направленной, монокристаллической и композиционной структуры в зависимости от температуры печи, метода охлаждения и скорости перемещения формы. Теоретически обоснованы требования к конструктивным параметрам литейных установок для получения отливок с направленной и монокристаллической структурой.

2. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден метод выбора режима НК, обеспечивающего формирование заданной макро- и микроструктуры. Метод заключается в определении максимальной допустимой скорости кристаллизации для каждого сечения отливки на основании выбранного критерия качества и результатов натурного или численного эксперимента.

3. Разработана модель конкурентного роста столбчатых зерен. Обоснован механизм подавления зерном, имеющим наименьший угол между одним из направлений роста $\langle 001 \rangle$ и вектором градиента температуры, зерен с иной кристаллографической ориентацией.

4. Разработана модель образования усадочной микропористости как механизма релаксации напряжений, возникающих в расплаве при кристаллизации из-за разности плотностей жидкого и твердого металла. Получены зависимости размеров и объемной доли микропор от технологических параметров процесса – градиента температуры в двухфазной зоне отливки и скорости кристаллизации.

5. Разработана модель формирования усадочной раковины в отливках с равноосной структурой. Предложен усовершенствованный метод пошагового определения формы усадочной раковины с учетом капиллярного питания междендритных пространств над свободной поверхностью расплава. Определены условия возникновения открытой и закрытой усадочной раковины и условия ее вырождения в рассеянную пористость.

6. Предложена модель образования макропористости в замкнутом тепловом узле отливки, учитывающая капиллярный эффект и дисперсность дендритного каркаса.

Достоверность научных положений и результатов исследования.

Теоретические исследования основываются на теории теплопроводности и тепло- и массообмена, а также феноменологической теории двухфазной зоны кристаллического слитка В.А.Журавлева, В.Т.Борисова и др.. Численные решения дифференциальных уравнений получены на конечно-разностной сетке методом прогонки. Теоретические положения подтверждены экспериментальными данными, полученными в ходе диссертационной работы или известными из литературных источников.

Экспериментальные исследования осуществлялись по стандартным методикам. Исследования макро- и микроструктуры проводились методами оптической металлографии. Количественное определение пористости проводилось методом гидростатического взвешивания по стандартной методике. Качественное исследование пористости проводилось рентгенографическим методом по стандартной методике ФГУП НПЦ газотурбостроения «Салют». Литейные свойства сплавов, необходимые при моделировании технологии литья, определялись расчетным путем по термодинамической базе COMPUTERM по химическому составу сплава с привлечением данных дифференциальной сканирующей калориметрии.

Практическая значимость результатов работы.

1. Разработан метод выбора оптимального режима направленной кристаллизации рабочих лопаток ГТД и ГТУ, обеспечивающий получение отливок с заданной структурой при максимальной производительности технологического оборудования. Метод защищен авторским свидетельством СССР № 1577170.
2. Разработана методика определения в промышленных условиях локальных значений скорости охлаждения расплава при направленной кристаллизации по параметрам дендритной структуры отливок

3. На основе математической модели формирования макропористости и усадочной раковины разработан программный модуль для коммерческого программного комплекса СКМ «Полигон».
4. Разработаны математические модели процессов получения отливок в литейных установках ВИАМ-1660(ФГУП ВИАМ), УВПП-2, ПМП-4 (ГП НПКТ «Зоря»-«Машпроект»), КОПП (ОАО «Завод турбинных лопаток»).
5. Разработано и внедрено программное обеспечение для отработки технологии литья крупногабаритных лопаток наземных ГТУ в печах УВПП-2 и ПМП-4.
6. Разработаны принципы и внедрена технология применения методов компьютерного моделирования при подготовке производства литых заготовок для деталей ГТД и ГТУ. Осуществлено методическое руководство внедрением и использованием методов математического моделирования литейных процессов на ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют». Разработана и внедрена документация в виде технологических и производственных инструкций, методических руководств, регламентирующая деятельность литейного производства при разработке технологии получения отливок опытных изделий и оптимизации серийных процессов литья.
7. Разработаны конструкции литейных блоков и температурно-временные параметры технологии получения отливок более 150 деталей для изделий опытного и серийного производства.

Личный вклад автора.

Автором лично получены: а) результаты теоретического и экспериментального исследования процесса направленной кристаллизации; б) методика выбора оптимального режима направленной кристаллизации; в) модель образования усадочной микропористости; г) модель образования усадочной раковины; д) модель образования макропористости; е) модель конкурентного роста столбчатых зерен; е) математические модели технологического процесса получения отливок в литейных установках УВПП-2, ПМП-4, КОПП.

Во всех работах, выполненных в соавторстве, личный вклад состоял в постановке задачи, определении методов решения и интерпретации полученных результатов.

Реализация практических результатов работы осуществлялась в соавторстве с ведущими специалистами литейного производства при совместной постановке соответствующих задач и обсуждении полученных результатов.

На защиту выносятся:

1. Математические модели тепловых условий направленной кристаллизации при радиационном и конвективном (в жидком металле) охлаждении формы.
2. Метод экспериментального изучения тепловых условий направленной кристаллизации, состоящий из методики измерения температуры в металлическом расплаве при температурах до 1800°C и методики обработки измерений с целью определения градиента температуры и скорости перемещения двухфазной зоны отливки.
3. Метод выбора режима НК, обеспечивающего формирование заданной макро- и микроструктуры.
4. Модель конкурентного роста столбчатых зерен. Механизм подавления зерном, имеющим наименьший угол между одним из направлений роста $\langle 001 \rangle$ и вектором градиента температуры, зерен с иной кристаллографической ориентацией.
5. Модели формирования усадочной микропористости.
6. Модель образования усадочной раковины и макропористости с учетом капиллярного питания двухфазной зоны отливки.
7. Концепция и комплекс специализированных программ для моделирования затвердевания отливки в промышленных литейных установках.
8. Методическое обеспечение внедрения и практического применения систем моделирования литейных процессов в литейном производстве.

Апробация работы.

Результаты работы доложены и обсуждены:

а) на Международных научных конференциях:

V Международной научно-технической конференции "Кристаллизация и компьютерные модели" (Ижевск, 1992 г.);

The Ninth International Symposium on Superalloys, "Superalloys 2000" (USA, 2000 г.);

Международной научно-практической конференции «Автоматизированный печной агрегат - основа энергосберегающих технологий металлургии XXI века» (Москва, 2000 г.);

The Twelfth International Heat Transfer Conference "Heat Transfer 2002" (France, 2002 г.);

III Международной научно-практической конференции "Прогрессивные литейные технологии» (Москва, 2005 г.);

IV Международной научно-практической конференции "Прогрессивные литейные технологии» (Москва, 2007 г.);

5-й Московской Международной конференции «Теории и практика технологии производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов (ТПКММ)», (Москва, 2007 г.);

The 7th Pacific Rim International Conference on Modeling of Casting and Solidification Processes (China, 2007 г.);

The 8th Pacific Rim International Conference on Modeling of Casting and Solidification Processes (Republic of Korea, 2010 г.).

The 13th International Conference on Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes (MCWASP_XIII, Austria, 2012).

б) на Российских научных конференциях:

I Всесоюзном симпозиуме "Жаростойкие и жаропрочные металлические материалы"(г. Звенигород 1989 г.);

I Уральской школе по росту кристаллов металлов и интерметаллидов из расплава (Свердловск, 1990 г.);

Научно-техническом семинаре "Механика и технология машиностроения" (Свердловск, 1990 г.);

IV Всесоюзной конференции по проблемам кристаллизации сплавов и компьютерного моделирования (Ижевск, 1991 г.);

Всероссийской научно-практической конференции "Новые материалы и технологии НМТ-2006» (МАТИ, Москва, 2006 г.);

Научно-практической конференции «Литье по выплавляемым моделям. Проблемы и пути их решения» Российской Ассоциации литейщиков (Воронеж, 2006).

Всероссийской научно-технической конференции «Машиностроительные технологии» (МГТУ им. Баумана, Москва, 2008).

«Новые материалы, прогрессивные технологические процессы и управление качеством в заготовительном производстве» (Рыбинск, 2007 г.);

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 40 работ, в том числе 21 статья в научных изданиях из перечня ВАК, без соавторов опубликовано 7 работ. Получено 5 свидетельств о регистрации электронного ресурса (программные модули и комплексы программ для ЭВМ) Объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование» Российской академии образования.

Структура и объем диссертации

Материал диссертации изложен на 300 страницах текста компьютерной верстки в формате 14 pt, Times New Roman, содержит 125 рисунков, 11 таблиц. Список литературных источников содержит 109 ссылок. Диссертация состоит из введения, 6 глав, общих выводов и списка литературных источников, списка публикаций по теме диссертации и 1 приложения, подтверждающего использование результатов диссертационной работы в промышленности.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность темы диссертационной работы, цели и задачи, новизна и научно-техническая значимость работы.

В первой главе дан ретроспективный анализ развития макроскопической теории кристаллизации и пути ее практического применения на основе упрощений, возможных применительно к конкретному технологическому процессу. В рамках этой теории в стационарном приближении рассмотрены теплофизические аспекты процесса направленной кристаллизации (НК) с охлаждением отливки на кристаллизаторе (метод Бриджмена) и в жидком металле (метод Liquid Metal Cooling, LMC).

Разработаны модели процесса направленной кристаллизации отливок простой геометрической формы (постоянного сечения и конечной длины) при устойчивом плоском фронте роста со скоростью кристаллизации порядка 10 мм/ч, необходимом для получения отливок никелевых жаропрочных сплавов с естественной композиционной структурой $\gamma/\gamma' - MeC$.

Математическая формулировка задачи представляет собой систему уравнений теплопроводности для трех зон отливки. В первой зоне моделируются условия радиационного нагрева боковой поверхности формы. Во второй зоне, длина которой равна толщине экранов, разделяющих нагреватель и холодильник установки для направленной кристаллизации, тепловой поток на боковой поверхности формы равен нулю. В третьей зоне боковая поверхность охлаждается излучением к боковому холодильнику (метод Бриджмена) или конвекцией в жидком металле. На поверхности кристаллизующего расплава задан теплообмен излучением, температура нижнего конца отливки определяется теплопередачей через дно формы к холодильнику.

В результате аналитического решения для линеаризованных граничных условий получены распределения температуры в зонах отливки и выражения для градиента температуры на фронте кристаллизации. Показано, что при кристаллизации отливки достаточной длины возможен выбор таких параметров технологического процесса, при которых значительная часть отливки вдали от

ее концов будет кристаллизоваться при постоянных условиях роста твердой фазы, в так называемом квазистационарном режиме.

Проведен анализ влияния технологических факторов и конструкции теплового узла установки для НК на тепловые условия в двухфазной зоне отливки. Получены зависимости градиента температуры на фронте роста от температуры нагревателей, способа охлаждения и температуры охладителя, от толщины и коэффициента теплопроводности материала формы.

На основе полученных аналитических решений сделан вывод, что в квазистационарном режиме кристаллизации максимальный градиент температуры в отливке, $G_{\max}$ и градиент температуры на фронте роста G (на изотерме T_s), определяются следующими выражениями

$$\begin{aligned} G &= -\nu(T_h - T_s) \\ G_{\max} &= -\frac{\varepsilon/H}{1 + \varepsilon/\nu}(T_h - T_x). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $\nu = (Bi_h P/S)^{1/2}$ и $\varepsilon = (Bi_x P/S)^{1/2}$; $Bi_h = k_h H/\lambda_m$, $Bi_x = k_x H/\lambda_m$ - критерии Био, характеризующие процесс теплопередачи между металлом, нагревателем и холодильником установки; λ_m - коэффициент теплопроводности металла; k_h - коэффициент теплопередачи с поверхности нагревателя через стенку формы к металлу; k_x коэффициент теплопередачи в зоне охлаждения; H, P, S - длина, периметр и площадь сечения отливки; T_h, T_x - безразмерные температуры нагревателя и холодильника.

Для увеличения градиента на фронте роста необходимо увеличивать температуру нагревателя и интенсифицировать теплопередачу через стенки формы. Увеличение температуры нагревателя должно быть скомпенсировано соответствующим увеличением интенсивности охлаждения отливки в холодильнике. Это необходимо для поддержания динамического равновесия в системе, при котором расположение фронта роста является оптимальным.

Выражение (1) является следствием фундаментального положения, справедливого не только для отливок с постоянным сечением: для увеличения

градиента температуры необходимо увеличить мощность источника, обеспечивающего поток тепла на фронте роста.

Интенсификация теплоотдачи только в холодильнике установки приводит к увеличению максимального градиента температуры, наблюдаемого в отливке, однако, величина G может оставаться неизменной за счет смещения фронта роста в сторону нагревателя.

На основании проведенного анализа показано, что основным направлением совершенствования режимов НК является создание условий, при которых двухфазная зона отливки располагается вблизи области максимального градиента температуры в отливке. При этом $G_{\max}$ должен быть на уровне, необходимом для формирования в отливке требуемой макро- и микроструктуры.

На начальном этапе кристаллизации градиент температуры и положение фронта кристаллизации зависят от термического сопротивления между фронтом и кристаллизатором и температуры нагревателя.

На последующих этапах градиент температуры существенно зависит от толщины экранов между горячей и холодной зонами печи, а также от толщины стенок и теплопроводности формы.

На основе анализа модели НК получены зависимости, связывающие, градиент температуры на фронте кристаллизации G и температуру нагревателя T_h с толщиной экранной зоны h_b и положением фронта кристаллизации относительно экранов ξ_s/h_b . Результаты справедливы для установившегося режима НК при малых скоростях перемещения формы порядка 10 мм/ч.

Величина градиента температуры на фронте кристаллизации и температура нагревателя, соответствующие заданному положению фронта в отливке x_s , определяются соотношением расстояний от фронта кристаллизации до нагревателя ξ_s/h_b и до холодильника $(1 - \xi_s/h_b)$ (рис. 1 и 2).

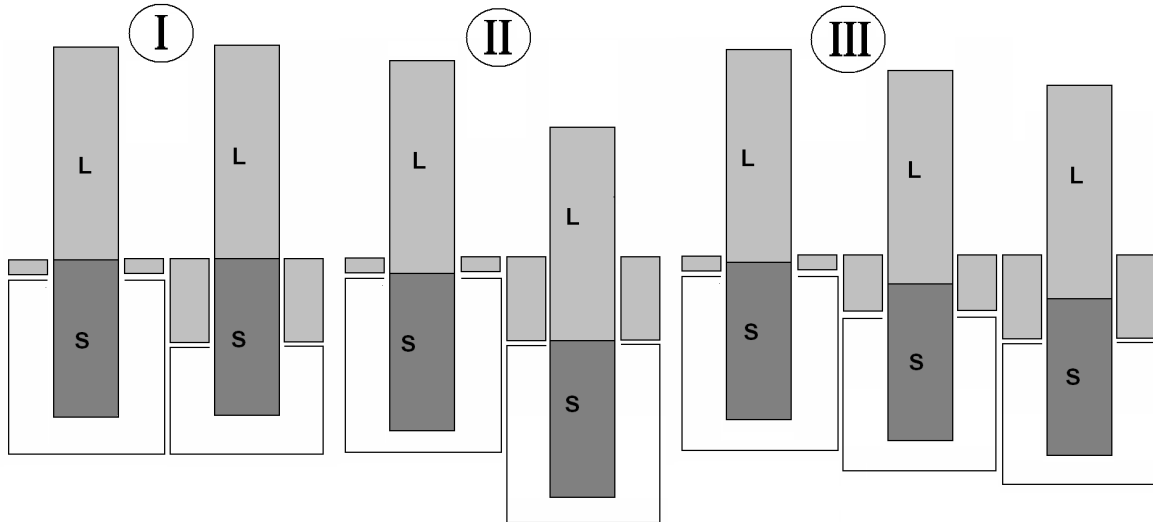


Рис.1. Схематическое изображение трех предельных режимов направленной кристаллизации. L – жидкая фаза; S – твердая фаза.

При расположении фронта вблизи верхней границы экранов $\xi_s / h_b \rightarrow 0$, увеличение толщины экранов приводит к удалению холодильника от фронта кристаллизации. В этом случае, показанном на рис.1 и рис.2 под цифрой I, градиент температуры преимущественно зависит от толщины экранов: $G = f(h_b)$ и $T_h \approx const$. При расположении фронта кристаллизации вблизи зоны охлаждения $\xi_s / h_b \rightarrow 1$, увеличение толщины экранов приводит к отдалению нагревателя от фронта кристаллизации. Связанное с этим уменьшение обогреваемой боковой поверхности формы должно быть компенсировано увеличением температуры нагревателя, градиент температуры вследствие неизменных условий охлаждения остается постоянным, т.е. $G \approx const$ и $T_h = f(h_b)$ (см. рис.1 и рис. 2, режим II).

При НК по методу Бриджмена существует такое положение фронта кристаллизации в экранной зоне ξ_s / h_b , при котором тенденции к увеличению температуры нагревателя T_h (вследствие удаления фронта от нагревателя) и к уменьшению T_h (вследствие удаления фронта от холодильника) компенсируют друг друга. В этом случае для любых h_b температура нагревателя остается неизменной (рис.2, III).

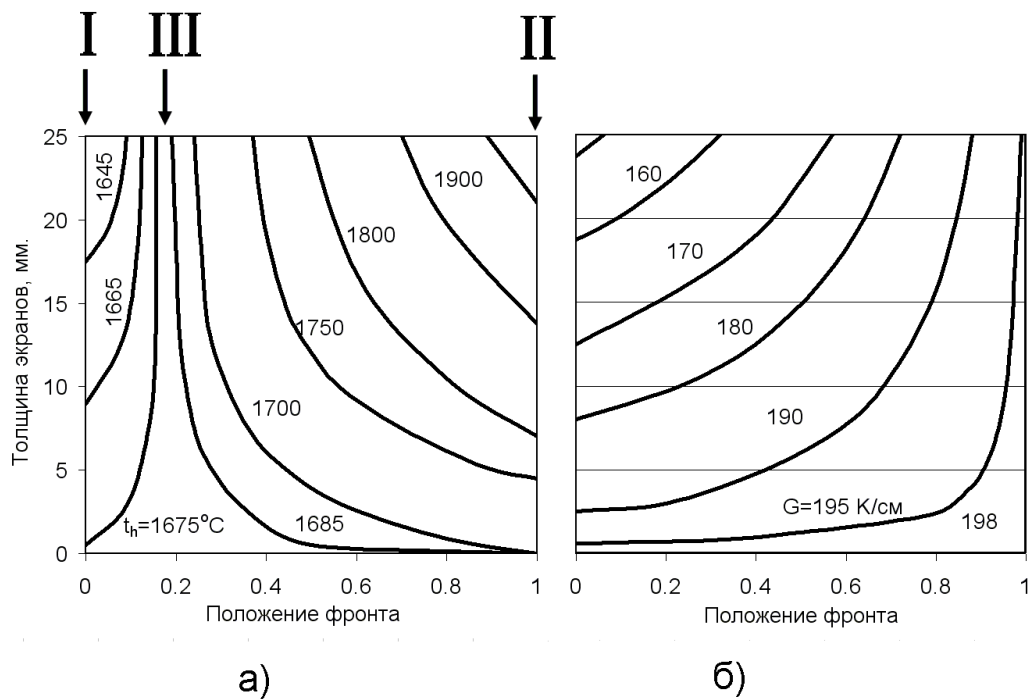


Рис.2. Зависимость температуры нагревателя (а) и градиента температуры (б) от толщины экранов h_b и положения фронта в экранной зоне ξ_s/h_b при фиксированном положении фронта в отливке (метод Бриджмена).

В рамках квазистационарной модели процесса НК изучено влияние формы на условия в двухфазной зоне отливки.

В формах с низким коэффициентом теплопроводности λ_f величины ν и ε определяются исключительно термическим сопротивлением стенок формы Δ_f/λ_f . Увеличение толщины стенки Δ_f ухудшает условия теплопередачи через боковую поверхность формы и приводит к увеличению температуры нагревателя, необходимой для удержания фронта кристаллизации в заданном положении. Увеличение термического сопротивления стенок формы приводит к существенному падению градиента температуры.

При малом термическом сопротивлении стенок формы значения ν и ε в (1) определяются преимущественно лучистым теплообменом на поверхности формы и поэтому прямо пропорциональны отношению периметров внешней и внутренней поверхностей формы, P_f/P . В этом случае увеличение термического сопротивления за счет увеличения толщины стенки формы (при $\lambda_f = \text{const}$) в значительной степени компенсируется интенсификацией

теплообмена излучением. Как следствие этого, наблюдается значительно меньшее снижение G (по сравнению с низкотеплопроводной формой) при меньшем увеличении температуры T_h .

Высокий коэффициент теплоотдачи от поверхности формы в охладитель обуславливает особенности влияния на условия кристаллизации по методу ЛМС толщины стенок формы и их термического сопротивления. Влияние толщины стенок формы Δ_f в виде отношения периметров формы и отливки P_f/P существенно в зоне нагрева боковой поверхности формы, если коэффициент теплопередачи излучением соизмерим с термической проводимостью стенок формы. В зоне охлаждения лимитирующим является термическое сопротивление стенок формы Δ_f/λ_f .

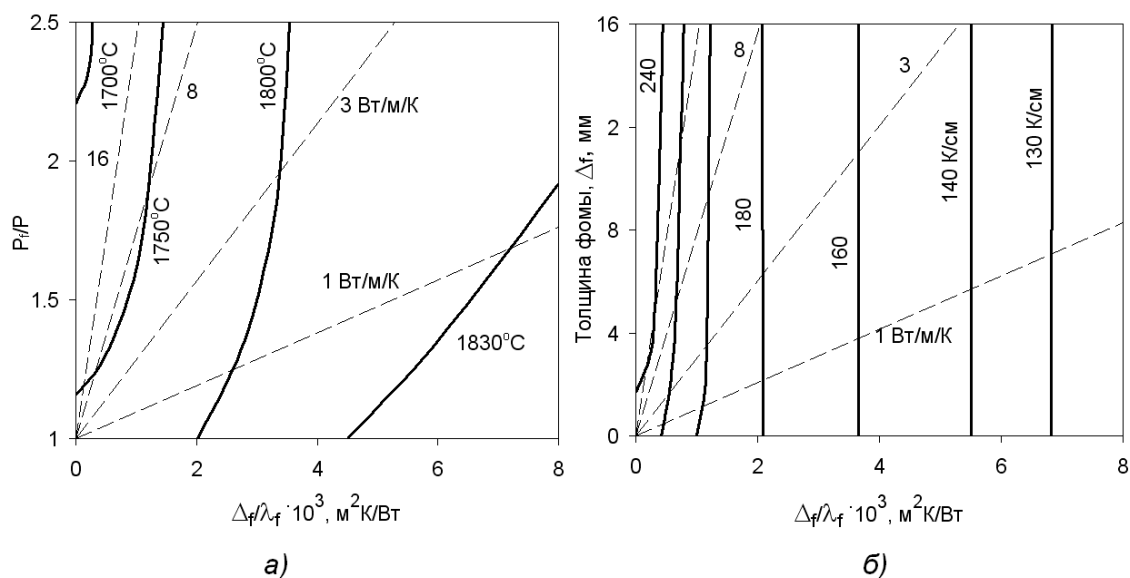


Рис.3. Зависимость температуры нагревателя а) и градиента температуры б) от толщины Δ_f и термического сопротивления стенок формы Δ_f/λ_f (метод ЛМС); P_f/P — отношение периметров внешней и внутренней поверхностей формы.

Преимущества жидкометаллического холодильника наиболее проявляются при направленной кристаллизации отливок сложной геометрической формы, например лопаток ГТД. В этом случае удастся обеспечить более стабильные условия охлаждения, чем при методе Бриджмена. Тем не менее, перемещение фронта роста из одного сечения сложной отливки в другое сопровождается дрейфом фронта (т.е. смещением его относительно теплового узла установки) и изменением градиента температуры.

В рамках квазистационарной модели НК показано влияние геометрии отливки на градиент температуры на изотерме солидуса и температуру нагревателя, обеспечивающую заданное положение изотермы относительно экранов. Изучено влияние толщины экранов h_b , разделяющих холодную и горячую зоны установки, на условия направленной кристаллизации отливок с различными, но постоянными отношениями $\Gamma = PH/S$. Установлено, что наиболее сильно тепловые условия направленной кристаллизации зависят от геометрии отливки в области малых значений Γ , соответствующих замку лопатки. В области больших значений Γ (перо турбинной лопатки) условия направленной кристаллизации мало зависят от величины этого комплекса параметров и фактически определяются расстоянием между горячей и холодной зонами установки.

В главе 2 представлена нестационарная модель кристаллизации отливок с дендритной, столбчатой и монокристаллической структурой, включающая уравнение теплопроводности для литейного блока металла, помещенного в опоку с опорным наполнителем и уравнение теплопроводности для водоохлаждаемого кристаллизатора. Математическая формулировка модели имеет следующий вид:

Уравнение теплопроводности для области «опока – засыпка – форма – металл»:

$$\left(\rho C_p + \rho \frac{df_L}{dT} L \right) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda \text{grad} T). \quad (2)$$

На границах расчетной области, участвующих в теплообмене излучением, задано граничное условие $-\lambda(\partial T / \partial \mathbf{n}) = E_{\text{рез}}(T^4)$. На поверхности контакта с кристаллизатором задано граничное условие $-\lambda(\partial T / \partial \mathbf{n}) = \alpha(T - \Theta(F, \tau))$, где $\Theta(F, \tau)$ – температура поверхности кристаллизатора, F , находящейся в контакте с опокой. Температура Θ , определяется решением уравнения теплопроводности для кристаллизатора:

$$(\rho C_p)_{ch} \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \lambda_{ch} \nabla^2 \Theta. \quad (3)$$

В этих выражениях τ – время; T, Θ – температура; ρ – плотность; C_p – теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности; L – скрытая теплота фазового перехода; f_L – доля твердой фазы; $\mathbf{n}$ – вектор нормали к поверхности; $E_{рез}$ – результирующий тепловой поток; ch – индекс, указывающий на принадлежность к кристаллизатору; α – коэффициент теплоотдачи на границе «опока – кристаллизатор».

С использованием зонального метода расчета получена система уравнений для разрешающих угловых коэффициентов излучения в системе тел, включающей опоку с установленной в ней формой и тепловой узел литейной установки, с учетом затенений и отражения тепловой энергии. Путем интегрирования по контуру, ограничивающему излучающие поверхности, получены аналитические выражения для локальных и средних угловых коэффициентов излучения и построены модели радиационного теплообмена для ряда опытных и промышленных литейных установок ВИАМ-1660(ФГУП ВИАМ), УВПП-2, ПМП-4 (ГП НПКТ «Зоря»-«Машпроект»), КОПП (ОАО «Завод турбинных лопаток»). Модели реализованы в комплексах программ для моделирования технологического процесса получения отливок в вышеперечисленных установках.

Расчетным путем получена количественная оценка эффективного коэффициента теплопроводности графитового боя используемого в качестве опорного наполнителя в промышленных литейных установках. Изучено влияние теплофизических характеристик опорного наполнителя на условия направленной кристаллизации жаропрочного сплава. Эффективный коэффициент теплопроводности опорного наполнителя зависит от размеров частиц и слабо зависит от теплопроводности материала засыпки, в данном случае – графита. Увеличение размера частиц опорного наполнителя приводит к повышению его эффективной теплопроводности.

В области высоких температур – выше 1000°C существенную роль играет перенос тепла излучением, что позволяет считать опорный наполнитель «полупрозрачной» средой.

Градиент температуры в двухфазной зоне отливки зависит от скорости перемещения формы с металлом, увеличение которой приводит к росту градиента температуры на изотермической поверхности солидуса и уменьшению на изотерме ликвидуса.

В квазистационарном режиме направленной кристаллизации градиент температуры в двухфазной зоне отливки и скорость охлаждения расплава не зависят от коэффициента теплопроводности опорного наполнителя. При расположении цилиндрической отливки в центре опоки значительно большего диаметра, градиент температуры и скорость охлаждения расплава в двухфазной зоне не зависят от диаметра отливки.

На основе результатов моделирования в коммерческой программе ProCAST построены регрессионные зависимости для градиента температуры, расстояния между первичными осями дендритов, объемной доли и размеров микропор для цилиндрических отливок из сплава ЖС26, отливаемых в печи УВНК-8П. Полученные зависимости позволяют оценить условия кристаллизации, структуру и качество отливок, получаемых методом направленной кристаллизации с применением жидкометаллического холодильника и сделать предварительный выбор температуры нагрева формы, температуры охладителя и скорости перемещения формы, обеспечивающих требуемое качество отливки, не прибегая к длительным расчетам.

Глава 3 посвящена методам экспериментального исследования процесса направленной кристаллизации и выбора оптимальной скорости перемещения формы.

Основной задачей экспериментального исследования процесса НК, как правило, является определение градиента температуры на выбранной изотерме и скорости ее перемещения. Методика определения градиента температуры заключается в измерении температуры в нескольких точках, расположенных

вдоль оси отливки, построении распределений температуры вдоль оси отливки для отдельных моментов времени и их дифференцировании. Число установленных термопар должно быть достаточным, чтобы аппроксимировать распределение температуры в отливке на заданном отрезке времени. Общий вид экспериментальной оснастки – термопарного чехла с установленными в нем шестью термопарами, используемой для измерения температуры в отливке, показан на рис.4. Конструкция чехла позволяет выбирать оптимальное расположение термопар вдоль оси отливки в зависимости от ее геометрии и целей эксперимента.

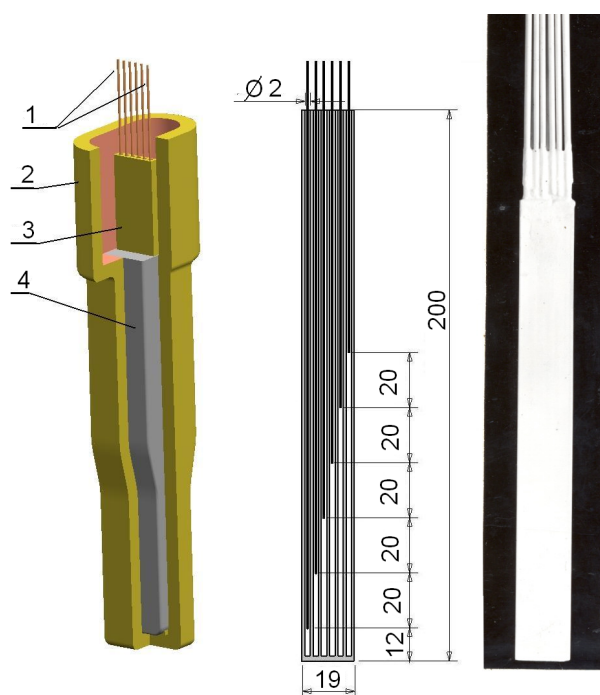


Рис.4.Термопарных чехол с установленными в нем шестью термопарами для измерения температуры в отливке при направленной кристаллизации. 1 – термопары; 2 – форма; 3 – термопарный чехол; 4 – металл.

В данной главе разработана методика оценки погрешности измерения температуры, определения градиента температуры и скорости кристаллизации.

Методика обработки экспериментальных данных допускает графическое построение распределений температуры. Для автоматизации этого процесса и использования методики в составе современных автоматизированных опытных установок была разработана методика аппроксимации экспериментальных данных решениями уравнения теплопроводности вида

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q(x, \tau) \quad (4)$$

при начальном условии $T(x, 0) = T_0$ и граничных условиях вида $T(0, \tau) = \varphi_1(\tau)$, $T(l, \tau) = \varphi_2(\tau)$. Здесь τ - безразмерное время (число Фурье); x - безразмерная координата; l - безразмерная длина отливки; T - безразмерная температура, например, $T = (T - T_{\min}) / (T_{\max} - T_{\min})$; $T_{\max}, T_{\min}$ - максимальная и минимальная температуры, зафиксированные в процессе термометрирования;

$$Q(x, \tau) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} \tau^{i-1} x^{j-1}.$$

Для решения обратной задачи теплопроводности использован метод регуляризации А.Н.Тихонова, заключающейся в отыскании неизвестных коэффициентов C_{ij} из условия минимума функционала вида

$$\Phi_\alpha[Q] = \frac{1}{2} \sum_{P=1}^{N_P} (Y_P - Y_P^{\text{exp}})^2 + \frac{\alpha}{2} \int_0^{\tau_m} \int_0^l (LQ)^2 dx d\tau, \quad (5)$$

где L - линейный непрерывный оператор; α - параметр регуляризации; Y_P^{exp} - экспериментальные данные; $Y_P = \sum_{k=1}^{N_C} C_k P_{kP}(x_P, \tau_P)$; $P_{kP}(x_P, \tau_P)$ - функции, полученные из решения уравнения (4).

Сложность и неоднозначность тепловых процессов, протекающих при НК сложных отливок, не позволяют прогнозировать технологические параметры только по изменению поперечного сечения отливки. В работе показана целесообразность управления процессом НК по параметрам, непосредственно определяющим тип структуры, т.е. по градиенту температуры G , скорости кристаллизации W и их отношению G/W .

Разработан метод выбора критической скорости перемещения формы в процессе НК, ограничивающей область режимов НК, при которых возможно получение требуемой структуры отливки. Для выбора оптимального технологического режима необходимо проведение одной пробной плавки или

вычислительного эксперимента. Полученные результаты позволяют рассчитать критическую скорость перемещения формы

$$V_{\text{крит}}(x_s) = \frac{A_{\text{эксп}}(x_s)}{(G/W)_{\text{крит}}} V_{\text{эксп}}(x_s), \quad (6)$$

где $A_{\text{эксп}}(x_s)$ - отношение G/W , как функция положения фронта кристаллизации, полученная при направленной кристаллизации отливки в пробной плавке, когда форма перемещалась со скоростью $V_{\text{эксп}}(x_s)$.

Критическая скорость $V_{\text{крит}}$ представляет собой максимальную допустимую скорость перемещения формы в момент кристаллизации сечения с координатой x_s , при которой выполняется условие $G/W \geq (G/W)_{\text{крит}}$ (рис.5). Метод прошел экспериментальную проверку при получении отливок с естественной композиционной структурой $\gamma/\gamma' - \text{MeC}$ в условиях плоского фронта роста и защищен авторским свидетельством.

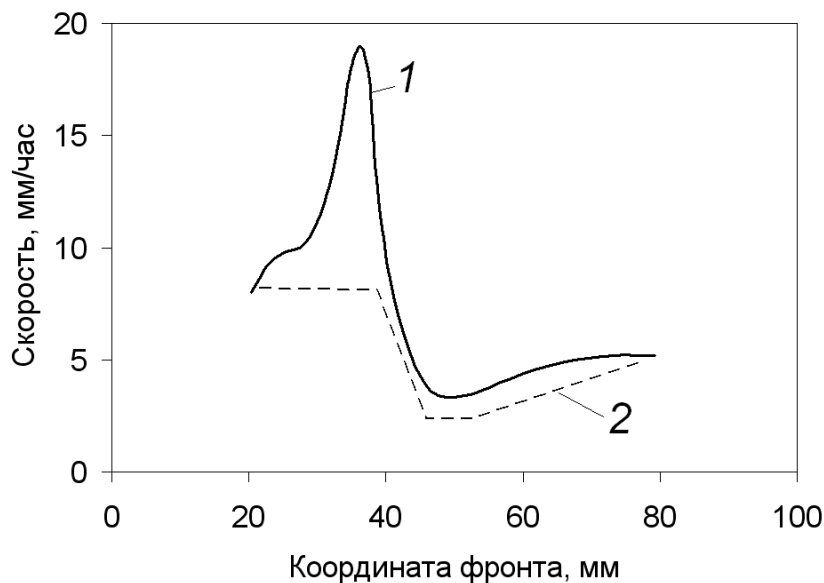


Рис.5. Критическая скорость (1) кристаллизации отливки с плавным переходом из тонкого в массивное сечение и выбранный оптимальный график перемещения формы (2), обеспечивший получение требуемой композиционной структуры.

С помощью экспериментального метода, предлагаемого в диссертационной работе, были исследованы тепловых условий НК отливок из сплава ЖС26 и получена количественная зависимость расстояния между дендритными осями первого порядка λ_1 от скорости охлаждения расплава на

фронте кристаллизации $GW, K/сек$: $\lambda_1 = 152,2 \cdot (GW)^{-0,333} [мкм]$. Полученная зависимость (рис.6) позволяет определить скорость охлаждения расплава по параметрам дендритной структуры.

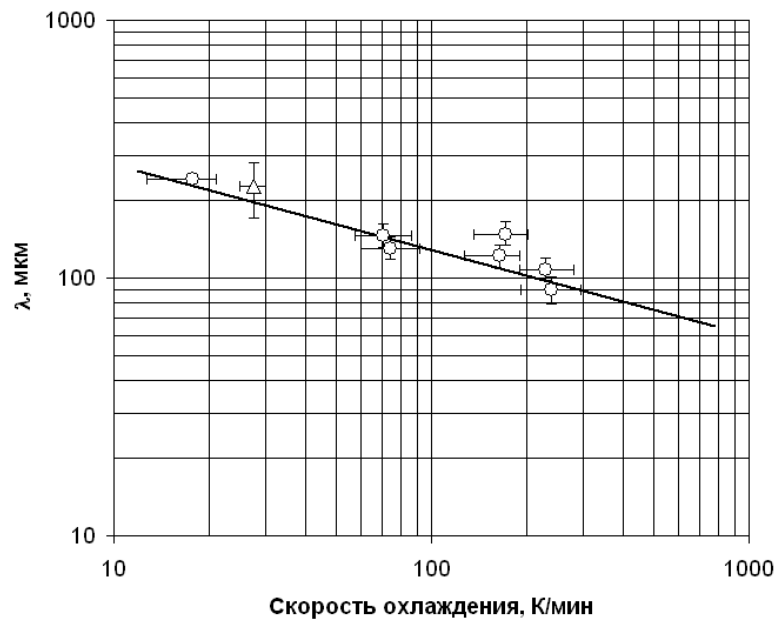


Рис.6. Расстояние между первичными осями дендритов в зависимости от скорости охлаждения расплава.

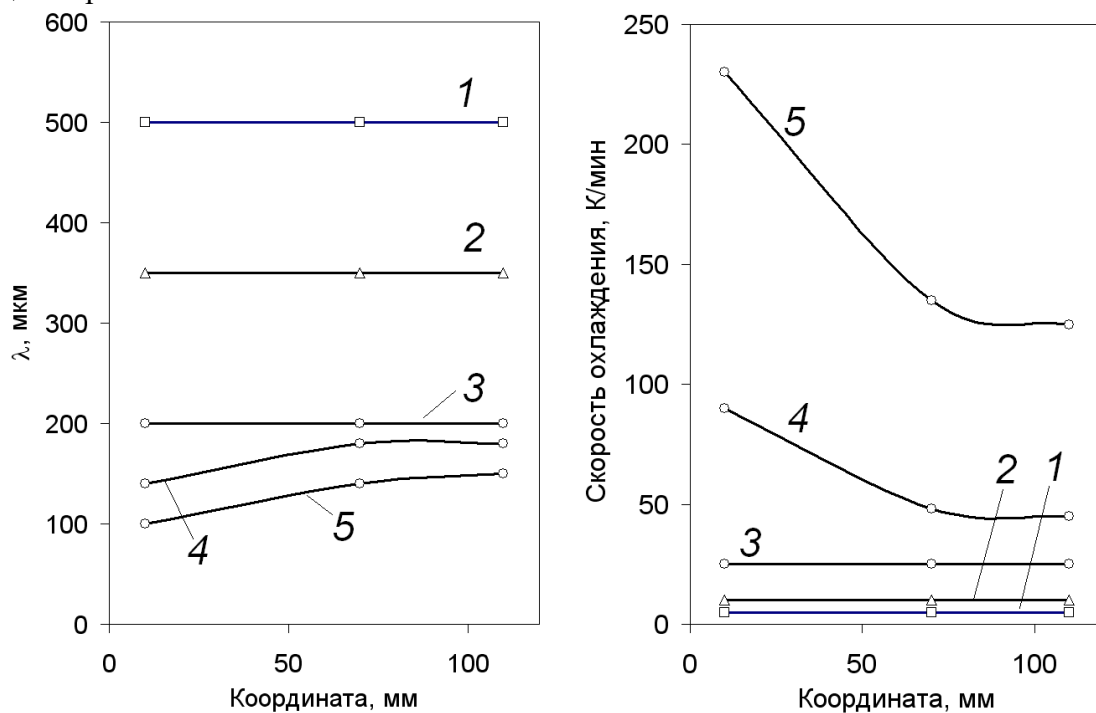


Рис.7. Расстояние между дендритными осями первого порядка и скорость охлаждения расплава на фронте кристаллизации цилиндрических отливок из сплава ЖС26, полученных в различных установках. 1 – ПМП-2; 2 – ВИАМ-1635; 3-5 – установка типа УВНК-8П с жидкометаллическим холодильником; 3 - 5 мм/мин; 4 – 10 мм/мин; 5 – 20 мм/мин.

На основе количественного анализа микроструктуры отливок из сплава ЖС26 были определены значения скорости охлаждения для промышленных установок типа ПМП, в печах с водохлаждаемым кристаллизатором (типа ВИАМ 1635) и в печах с охлаждением в жидком алюминии (УВНК-8П), а также для ряда опытных установок (рис.7).

В главе 4 рассмотрены вопросы образования в отливках микро- и макропористости, а также усадочной раковины.

В рамках макроскопической теории кристаллизации слитка предложена модель образования микропористости в отливках из никелевых жаропрочных сплавов, получаемых методом направленной кристаллизации. Образование и рост пор рассматривается как способ релаксации напряжений, возникающих в расплаве вследствие фазового перехода. Давление в расплаве определяется выражением $P = P_a + P_m + \Delta P_\varepsilon$, где P_a - внешнее атмосферное давление; P_m - металлостатическое давление; P_ε - падение давления из-за деформации расплава вследствие кристаллизации, определяемое как

$$\Delta P_\varepsilon = -a^2 \rho_l \frac{\Omega}{(f_l + \Omega)} \approx -E \varepsilon, \quad (7)$$

где $a = \sqrt{dP/d\rho_l}$ - скорость звука в расплаве; $E = a^2 \rho_l$ - модуль сжимаемости расплава; f_l - объемная доля жидкой фазы; Ω - объемная доля усадочного дефекта (объема деформации расплава); $\varepsilon = \Omega/f_l$ - деформация расплава; ρ_l - плотность расплава.

Образование усадочной поры происходит при падении давления в расплаве до критической величины P_{cav} .

Наибольший объем, который может быть занят порой, определяется объемной долей усадки с момента возникновения поры до завершения кристаллизации $\Omega = \Omega^* + \beta f_l^* / (1 + \beta)$, где $\beta = \rho_s / \rho_l - 1$ - коэффициент усадки; ρ_l, ρ_s - плотность жидкой и твердой фаз. Надстрочным символом * обозначены значения объемной доли в момент образования поры. После возникновения

поры прекращается питание данной точки двухфазной зоны и вся возникающая в последствии усадка компенсируется только за счет роста поры. В связи с образованием и ростом поры происходит релаксация растягивающих напряжений в расплаве, т.е. повышение давления P . После зарождения поры, уровень растягивающих напряжений в расплаве определяется кривизной поверхности раздела между порой и расплавом. Относительная деформация расплава в присутствии поры равна $\varepsilon = (\Omega - f_p)/f_l$.

Уравнение баланса массы в элементарном объеме кристаллизующейся жидкости с учетом усадки металла, течения расплава и образования пористости, записанное через деформацию расплава, имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla \cdot \left(\rho_L \frac{KE}{\mu} \nabla \left(\frac{\Omega - f_p}{f_l} \right) \right) = 0, \quad (8)$$

где K - проницаемость дендритного каркаса; μ - динамическая вязкость расплава.

На основе численного решения уравнения (8) для квазистационарного процесса направленной кристаллизации получены зависимости объемной доли f_p и приведенного радиуса R_p пор от градиента температуры и скорости кристаллизации в предположении, что $f_p = \Omega$ и $R_p = \sqrt[3]{3V_c f_p / 4\pi}$, $V_c = \lambda_l^2 \lambda_{II}$, где V_c - объем междендритного пространства, ассоциированного с микропорой; λ_{II} - расстояние между вторичными осями дендритов. Расчеты, проведенные для сплавов ЖС26 и ЖС32, показали, что при значении доли жидкой фазы ниже 0,2 начинается рост объемной доли усадочного дефекта Ω , а ниже $f_l = 0,05$ приток расплава практически прекращается, о чем свидетельствует резкий рост относительной деформации расплава и резкое падение давления. Высокая скорость падения давления определяется большой величиной модуля сжимаемости расплава и резким падением проницаемости дендритного каркаса.

Полученные результаты показывают, что формирование микропористости происходит на заключительной стадии кристаллизации двухфазной зоны. Пора образуется в объеме отливки, ограниченном двумя

пространственными масштабами: в направлении роста - протяженностью двухфазной зоны, в поперечном направлении – размером дендритной ячейки, λ_l .

В связи с тем, что поперечный масштаб рассматриваемого процесса существенно меньше поперечного размера отливки, f_p и R_p целиком определяются условиями в двухфазной зоне. Получены регрессионные зависимости объемной доли f_p и приведенного радиуса R_p микропор от градиента температуры и скорости направленной кристаллизации для сплава ЖС26 при критическом давлении образования поры $P_{cav} = -0.01$ МПа:

$$R_p = 26.7 - 0.3266G - 0.8837W + 0.0027GW + 0.00138G^2 + 0.054316W^2, \quad (9)$$

$$\sigma = 0.98,$$

$$f_p = 0.002315 + 5.43 \cdot 10^{-5}G + 0.05319W - 1.04 \cdot 10^{-4}GW, \quad \sigma = 0.02. \quad (10)$$

Уравнения (9),(10) зависят от конфигурации отливки лишь в той мере, в которой от нее зависят G и W , что делает их применимыми к отливкам различной конфигурации, получаемым методом НК.

В диссертации разработана модель формирования усадочной раковины, учитывающая капиллярный эффект в питании междендритных пространств над свободной поверхностью расплава и усовершенствованный метод пошагового определения положения зеркала расплава.

Модель рассматривает следующие этапы эволюции теплового узла в кристаллизующейся отливке

1. Образование открытой усадочной раковины. В рамках предложенной модели свободная поверхность расплава существует до момента образования неподвижного дендритного каркаса. Перемещение свободной поверхности вследствие усадки металла при кристаллизации приводит к образованию открытой усадочной раковины. После образования неподвижного дендритного каркаса, благодаря капиллярному эффекту, междендритные пространства полностью заполнены расплавом, и свободная поверхность расплава как таковая не существует.

2. Образование свободной поверхности расплава в замкнутом тепловом узле. В отсутствие свободной поверхности, усадка расплава вследствие кристаллизации приводит к деформации расплава и падению давления в тепловом узле. При падении давления ниже критического происходит образование новой поверхности раздела - свободной поверхности расплава, что приводит к релаксации возникающих напряжений. Образованию внутренней усадочной раковины способствуют малая площадь свободной поверхности расплава и большой объем кристаллизующегося расплава. Существенную роль играет направление отвода тепла. Образование внутренней усадочной раковины может быть связано с высокой интенсивностью охлаждения поверхности расплава.

3. Образование макропористости в замкнутом тепловом узле. На этом этапе во всем объеме теплового узла существует неподвижный каркас твердой фазы, что делает невозможным существование свободной поверхности расплава. При падении давления ниже критического происходит образование макропористости. Питание происходит путем перемещения расплава из мест образования макропористости к периферии теплового узла. Размеры макропор зависят от размеров междендритных пространств в соответствии с балансом сил:

$$P_a + P_m - \varepsilon E = -2\sigma/(\lambda_{II} f_L), \quad (11)$$

Где σ - поверхностное натяжение.

Кристаллизационная усадка металла инициирует рост ранее возникших пор. По мере роста доли твердой фазы и уменьшения проходного сечения междендритных пространств растет капиллярное давление, препятствующее росту существующей поры, и создаются условия для возникновения новых пор. Объемная доля пор зависит от выбора параметров модели P_{cav} , E и λ_{II} , определяющих момент достижения давления, при котором начинает образовываться пористость. Результаты моделирования согласуются с результатами металлографического исследования отливок и результатами моделирования в стандартной модели СКМ Полигон (рис.8).

Разработаны алгоритмы имитационного моделирования и программный модуль для системы компьютерного моделирования литейных процессов СКМ ЛП «ПолигонСофт».

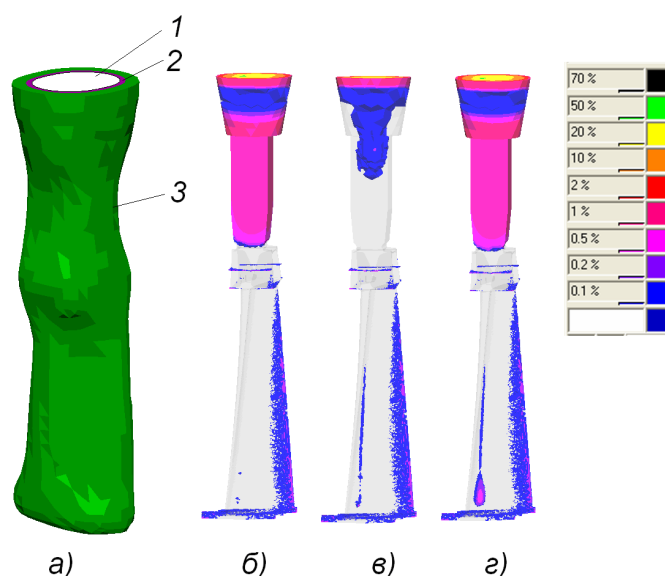


Рис.8. Результат моделирования пористости в рабочих лопатках ГТУ СТ-20. а) внешний вид литейного блока; б) - $P_{cav} = -1$ МПа, $\lambda_{II} = 30$ мкм, $E = 200$ МПа; в) - $P_{cav} = -0,1$ МПа, $\lambda_{II} = 300$ мкм, $E = 2000$ МПа; г) - $P_{cav} = -0,1$ МПа, $\lambda_{II} = 30$ мкм, $E = 2000$ МПа. 1 – отливка; 2 – керамическая оболочка; 3 – теплоизоляция.

В главе 5 рассмотрен конкурентный рост столбчатых зерен в стартовой зоне при НК монокристаллических отливок, формирование макроструктуры отливок и ее дефектов в виде паразитных зерен.

Предложен механизм конкурентного роста столбчатых зерен, основанный на опережающем росте зерна, одно из направлений $\langle 001 \rangle$ роста которого имеет наименьший угол отклонения от вектора градиента температуры. Подавление лидирующим зерном своих соседей происходит в том случае, если опережение составляет величину, превышающую расстояние между вторичными осями дендритов. Исходя из равенства осевых составляющих скоростей роста пары зерен с различной кристаллографической ориентацией, получен критерий подавления одного зерна другим:

$$\frac{W}{kG\lambda_{II}} \left(\frac{1}{\cos \beta_2} - \frac{1}{\cos \beta_1} \right) > 1, \quad (12)$$

где k - кинетический коэффициент; β_1 и β_2 - с углы отклонения направлений [001] от вектора градиента.

На основе этого предположения определены области режимов направленной кристаллизации, при которых возможно подавление зерном с направлением [001], совпадающим с вектором градиента температуры, зерен с иной кристаллографической ориентацией, в зависимости от угла разориентации (рис.9).

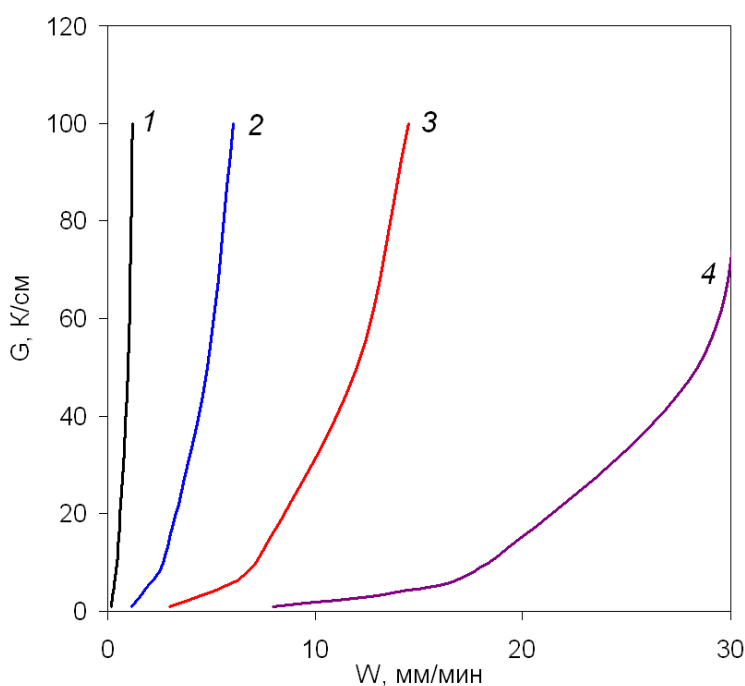


Рис.9. Граница области конкурентного роста при направленной кристаллизации никелевого жаропрочного сплава для пары зерен с углами отклонения от вектора градиента β_1 и β_2 , где $\beta_1 = 0$ ([001]); 1 - $\beta_2 = 54^\circ$; 2 - $\beta_2 = 20^\circ$; 3 - $\beta_2 = 10^\circ$; 4 - $\beta_2 = 5^\circ$. Выше показанных кривых подавление зерен с отклонением менее β_2 невозможно.

На основе развиваемой в диссертации геометрической модели роста зерен дан анализ опасности возникновения «паразитных» зерен в отливках переходными сечениями типа «замок-перо». Показано, что опасность возникновения «паразитных» зерен актуальна, прежде всего, для сплавов с низким кинетическим коэффициентом k , не склонных к переохлаждению. Теоретически показано, что с ростом скорости охлаждения GW растет величина переохлаждения расплава в переходном сечении отливки. Увеличение GW приводит также к уменьшению общего времени кристаллизации

переходного сечения отливки. Время $\delta\tau$ существования области с некоторой величиной переохлаждения $\Delta T > \Delta T'$ зависит от условий кристаллизации (GW), природы сплава (k) и характерного размера переходного сечения S :

$$\delta\tau = \sqrt{\frac{2S}{kGW}} - \frac{\Delta T'}{GW}. \quad (13)$$

Теоретически установлено, что с увеличением скорости охлаждения расплава растет как время существования зоны глубокого переохлаждения расплава, так и величина этого переохлаждения, что способствует образованию в монокристаллической отливке дефектов в виде «паразитных» зерен.

Разработана имитационная модель конкурентного роста зерен при направленной кристаллизации, основанная на численном решении уравнения движения фронта роста. Решение дает массив изолиний постоянного времени кристаллизации, что позволяет проследить продвижение поверхности раздела твердой и жидкой фаз по отливке.

В модели предполагается взаимодействие между зернами только путем непосредственного контакта. Нелинейные эффекты, связанные с изменением поля концентрации и распределения температуры в расплаве вследствие разделительной диффузии и выделения теплоты кристаллизации во внимание не принимаются. Благодаря этому, возможна суперпозиция результатов имитационного моделирования роста зерен с различной кристаллографической ориентацией. Алгоритм имитации процесса роста одного зерна может быть применен для моделирования роста нескольких зерен, результирующий массив времени кристаллизации отливки при одновременном росте нескольких зерен формируется путем сравнения времени кристаллизации отдельных зерен и занесения в результирующий массив наименьшего из них. Суперпозиция правомерна, поскольку при малом термическом переохлаждении в $1 \div 2^\circ\text{C}$, необходимом для роста твердой фазы, наложенное распределение температуры не зависит от числа зерен и их ориентации.

Глава 6 посвящена практическому использованию результатов диссертационной работы и их внедрению в промышленность.

Результаты теоретических исследований квазистационарного процесса НК были использованы при создании лабораторных установок для получения отливок с композиционной структурой $\gamma/\gamma' - MeC$. Дано теоретическое обоснование конструкции теплового узла установки для НК цилиндрических образцов по методу Бриджмена. Разработаны режимы НК с градиентом температуры до 180К/см, достигаемым за счет применения бокового холодильника и оптимизации условий теплопередачи к кристаллизатору. Теоретически обоснована конструкция теплового узла с двухзонным нагревателем для установки с жидкометаллическим холодильником. Двухзонный нагреватель позволил увеличить градиент температуры до 240 К/см путем локализации зоны интенсивного нагрева формы перед фронтом роста, не увеличивая температуру металла и формы вдали от фронта роста, что существенно понижает интенсивность взаимодействия формы с расплавом и риск ее разрушения из-за потери прочности при высоких температурах.

В рамках научно-исследовательских работ, направленных на разработку и внедрение сплавов с естественной композиционной структурой, был опробован метод выбора оптимального режима направленной кристаллизации. Метод защищен авторским свидетельством СССР № 1577170. Совместно с Ю.А.Бондаренко на установке УВНЭС-3 по режиму направленной кристаллизации с переменной скоростью перемещения формы получена литая заготовка рабочей лопатки газовой турбины авиационного двигателя с композиционной структурой по всей длине отливки. Обоснована применимость метода к направленной кристаллизации отливок с дендритной (в том числе монокристаллической) структурой.

На основе теоретических исследований условий конкурентного роста столбчатых зерен получено обоснование режимов стабильного получения отливок с монокристаллической структурой, исключающих образование ростовых дефектов в виде паразитных зерен.

Обширный экспериментальный материал, полученный на опытных и лабораторных установках, подтвердил основные теоретические положения,

разработанные в данной диссертации, и послужил основой для дальнейшего развития и практического применения этих положений.

Результаты диссертационной работы были использованы при разработке программных кодов для моделирования процессов получения отливок с направленной и равноосной структурой.

Разработан и внедрен на ГП НПКТ «Зоря»-«Машпроект», г. Николаев программный комплекс *CASTDS2D* для моделирования технологии получения крупногабаритных лопаток ГТУ с равноосной структурой на установке УВПП-2.

Разработан и внедрен на ГП НПКТ «Зоря»-«Машпроект», г. Николаев в 1998 г. программный комплекс *PMP3D* для моделирования технологии получения рабочих лопаток ГТД с направленной и монокристаллической структурой на установке ПМП-4.

Разработан и включен в состав коммерческого программного комплекса СКМ «Полигон» программный модуль для моделирования макропористости и усадочной раковины.

Разработан программный комплекс *KOPPCAST3D* для моделирования технологического процесса получения отливок с равноосной и направленной структурой в установках фирмы KOPP (ОАО «Завод турбинных лопаток», СПб).

Результаты диссертационной работы были применены в практической работе на ФГУП НПЦ газотурбостроения «Салют» при внедрении систем компьютерного моделирования литейной технологии СКМ ЛП «ПолигонСофт» и ProCAST. В целях эффективного использования этих программных комплексов были решены ряд научных и организационно-технических задач. Были решены методические задачи, связанные с порядком применения литейных программ в опытном производстве. Как следствие этого, были определены и выполнены организационные мероприятия по созданию отдела САПР ЛП, набору и обучению специалистов. Выпущена производственная инструкция, определяющая порядок взаимодействия отдела САПР ЛП с

конструкторскими отделами и подразделениями литейного комплекса, включающего три литейных цеха, а также с соответствующими службами Управления Главного металлурга. Организована трехуровневая система повышения квалификации специалистов отдела. Проведено обучение на семинарах в отделе, совершенствование знаний CAD-систем на курсах повышения квалификации, действующих на предприятии, ознакомление с теоретическими основами моделирования литейных процессов – на ежегодных курсах Solidification Course (Швейцария) с участием крупнейших специалистов в области физического металловедения.

На основе имеющего экспериментального материала и литературных данных проведена работа по выбору граничных условий, адекватно отражающих особенности литейного производства на предприятии. Методами расчета в термодинамической базе данных CompuTherm с привлечением данных дифференциального термического анализа определены теплофизические свойства литейных сталей и сплавов в твердом и жидком состоянии. Разработана оригинальная методика подготовки геометрической информации, позволяющая многократно сократить время на проведение расчетов.

Разработаны конструкции литейных блоков и температурно-временные параметры технологии получения отливок более 150 деталей для изделий опытного и серийного производства. Результаты выполненных работ отражены в производственных инструкциях, технологических указаниях, отчетах и рекомендациях, перечень которых приведен в приложениях к диссертации.

Общие выводы и результаты работы.

1.Обобщены и получили развитие научные представления о тепловых процессах, определяющих формирование композиционной и дендритной структуры отливок при направленной кристаллизации.

2. Разработана модель процесса направленной кристаллизации отливок со структурой $\gamma/\gamma' - MeC$ в условиях плоского фронта роста. Установлена связь условий на фронте роста с параметрами технологического процесса и

конструктивными особенностями литейной установки. Определены пути усовершенствования технологического процесса. Показано, что для повышения градиента температуры необходимо увеличивать температуру нагрева формы и/или скорость ее перемещения.

3. Разработан метод экспериментального исследования тепловых условий НК, позволяющий определить градиент температуры и положение фронта роста для любого момента времени в течение всего технологического цикла.

4. Разработан и экспериментально подтвержден на отливках различной геометрической формы экспресс-метод выбора оптимального режима НК лопаток ГТД, позволяющий по результатам одной плавки определить оптимальный режим НК и получить требуемую структуру в пере, замке и переходных сечениях отливки.

5. Разработана модель формирования микропористости, в которой образование поры рассматривается как способ релаксации усадочных напряжений, возникающих при кристаллизации расплава. Получено основное дифференциальное уравнение модели, определяющее связь между деформацией расплава, усадкой металла, течением расплава в дендритном каркасе и образованием пор. Получены зависимости объемной доли и приведенного радиуса пор от градиента температуры и скорости кристаллизации. Полученные зависимости носят общий характер и применимы к различным отливкам независимо от их геометрической формы.

6. Разработана модель формирования усадочной раковины и макропористости в отливке, учитывающая капиллярный эффект и дисперсность дендритного каркаса.

7. Предложен механизм конкурентного роста столбчатых зерен в кристаллоотборнике при направленной кристаллизации монокристаллических отливок. Определены условия подавления лидирующим зерном соседей с иной кристаллографической ориентировкой. Показано, что благоприятными для получения монокристаллических отливок с ориентировкой [001] являются режимы направленной кристаллизации с высокой скоростью кристаллизации и

небольшим градиентом температуры. Напротив, для получения монокристалла [111] необходим высокий градиент температуры при небольшой скорости кристаллизации.

8. Показано, что образование паразитных зерен в переходных сечениях отливки типа «перо-замок» более вероятно при высокой скорости роста. Существенную роль в образовании этих дефектов играет склонность расплава к переохлаждению и чистота металла.

9. Разработаны специализированные программные комплексы для моделирования технологии получения отливок с равноосной, направленной и монокристаллической структурой, отличающиеся от известных коммерческих продуктов автоматизацией формирования граничных условий для определенного вида промышленных литейных установок.

10. Изучены теплофизические особенности применения опорного наполнителя при литье фасонных отливок из никелевых жаропрочных сплавов и сталей по выплавляемым моделям. Установлено, что в условиях направленной кристаллизации эффективный коэффициент теплопроводности опорного наполнителя зависит от размеров частиц и слабо зависит от теплопроводности материала засыпки. В области высоких температур – выше 1500°C преобладает перенос тепла излучением, что позволяет считать опорный наполнитель «полупрозрачной» средой. Увеличение размера частиц опорного наполнителя приводит к повышению его эффективной теплопроводности

11. Теоретически обоснованы режимы направленной кристаллизации крупногабаритных лопаток ГТД с применением опорного наполнителя. Установлено, что в квазистационарном режиме направленной кристаллизации градиент температуры в двухфазной зоне отливки и скорость охлаждения расплава не зависят от коэффициента теплопроводности опорного наполнителя. При расположении отливки в центре опоки значительно большего диаметра, градиент температуры и скорость охлаждения расплава в двухфазной зоне не зависят от поперечного сечения отливки.

12. Разработаны методические основы применения компьютерного моделирования при подготовке производства опытных отливок. Разработаны и реализованы на ФГУП НПЦ газотурбостроения «Салют» методики моделирования литейной технологии получения отливок с равноосной, направленной и монокристаллической структурой из никелевых жаропрочных сплавов и сталей.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

Отдельные издания:

1. Монастырский В.П. Математическое моделирование процесса направленной кристаллизации, Москва, МГТУ «МАМИ», 2011, 178 с. (монография).

Статьи в рецензируемых научных изданиях и изданиях из списка ВАК РФ:

1. Монастырский В.П., Логунов А.В. Принципы расчета тепловых условий, обеспечивающих оптимальные параметры процесса направленной кристаллизации жаропрочных сплавов//Авиационные материалы, 1980, вып.1, с.59-68, ОНТИ ВИАМ.
2. Хуснетдинов Ф.М, Логунов А.В., Монастырский В.П. Высокоградиентное нагревательное устройство для направленной кристаллизации.//Авиационные материалы 1981, вып.3, с.87-92, ОНТИ ВИАМ.
3. А.В.Логунов, В.П.Монастырский. Методика расчета тепловых условий при литье деталей из жаропрочных сплавов методом направленной кристаллизации. В сб. Теплофизические исследования жаропрочных сплавов и теплозащитных покрытий. Под ред. А.И.Ковалева и И.М.Хацинской, Авиационные материалы, 1983, с.81-99, ОНТИ ВИАМ.
4. Монастырский В.П., Логунов А.В. Обратная задача теплопроводности при направленной кристаллизации//Физика и химия обработки материалов, 1984, N1,с.28-35.
5. Монастырский В.П., Логунов А.В. Об управлении процессом направленной кристаллизации//Физика и химия обработки материалов, 1984, N4,с.60-65.
6. Монастырский В.П., Логунов А.В. Математическая модель процесса направленной кристаллизации слитков простой геометрической формы//Авиационные материалы, 1984, вып.4, с.46-59, ОНТИ ВИАМ.
7. Монастырский В.П., Логунов А.В. Направленная кристаллизация слитков простой геометрической формы по методу Бриджмена//Авиационные материалы, 1984, вып.4, с.59-70, ОНТИ ВИАМ
8. Монастырский В.П., Бондаренко Ю.А. Направленная кристаллизация лопаток ГТД из сплава ВКЛС-20/Труды IV научно-технических чтений, посвященных памяти А.Т.Туманова. 25 апреля 1986 г.//Авиационные материалы, вып.4, 1990 г., ОНТИ ВИАМ.
9. Светлов И.Л., Кулешова Е.А., Монастырский В.П. и др. Влияние направленной кристаллизации на фазовый состав и дисперсность структуры никелевых сплавов//Известия АН СССР, Металлы, №1, 1990, с.86-93.
10. Монастырский В.П., Монастырская Е.В., Зуев А.В. Теплофизические особенности направленной кристаллизации с применением опорного наполнителя. Физика и химия обработки материалов, 2004, №5, с.79-87
11. Монастырский В.П. Условия создания высокого градиента температуры при выращивании монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов методом

направленной кристаллизации. Физика и химия обработки материалов, 6 (2004), с. 77-83.

12. Поклад В.А., Оспенникова О.Г., Рудницкий С.В., Алферов А.И., Родионов В.И., Монастырский В.П. Применение CALS-технологий в литейном производстве ФГУП ММПП «Салют»//Литейное производство, №8, 2007, с.6-8, 15-17.
13. Монастырский В.П., Александрович А.И., Монастырский А.В., Соловьев М.Б., Тихомиров М.Д. Моделирование напряженно-деформированного состояния отливки при кристаллизации//Литейное производство, №8, 2007, сс.45-47.
14. Монастырский В.П., Монастырский А.В., Левитан Е.М. Разработка технологии литья крупногабаритных лопаток ГТД для энергетических установок с применением систем «Полигон» и ProCAST//Литейное производство, №9, 2007, сс.29-34.
15. Монастырский В.П. Модель образования усадочной раковины в отливке//Литейное производство, №12, 2007, сс.13-14.
16. Монастырский В.П. Моделирование и оптимизация процесса направленной кристаллизации рабочих лопаток ГТД // Литейщик России, №7, 2009, сс.18-23.
17. Монастырский В.П. Особенности интерпретации термической кривой при ДТА и ДСК анализе никелевых жаропрочных сплавов//Заводская лаборатория. Диагностика материалов. №8.2011. Том 77, с.23-29.
18. Монастырский В.П. Моделирование микропористости в отливках, затвердевающих в условиях направленного теплоотвода//Тепловые процессы в технике, т.3, №1, 2011, стр.20-27
19. Монастырский В.П. Моделирование образования макропористости и усадочной раковины в отливке//Литейщик России, №10, 2011, сс.16-21.
20. Монастырский В.П., Рожкова М.К. Регрессионная модель процесса направленной кристаллизации отливок из никелевых жаропрочных сплавов в установке УВНК-8П//Литейщик России, №1, 2012, сс.22-27.
21. Монастырский В.П., Кондратьева М.С. Моделирование направленной кристаллизации отливок из никелевых жаропрочных сплавов в установке с водоохлаждаемым кристаллизатором//Литейщик России, №1, 2013, сс.23-27.

В других изданиях:

1. Логунов А.В., Монастырский В.П., Разработка принципов расчета оптимальных условий направленной кристаллизации эвтектических сплавов/Тезисы докладов на I Всесоюзной научно-технической конференции "Закономерности - формирования структуры сплавов эвтектического типа". Днепропетровск, ДМИ, 1979., с.115
2. Карасев Б.Е., Логунов А.В., Чуприков Г.Е., Монастырский В.П. Современное состояние и основные проблемы развития литья деталей из жаропрочных и других сплавов/Материалы Республиканской научно-технической конференции "Пути интенсификации технического перевооружения литейного производства и задачи повышения качества и снижения металлоемкости". 1984., Ташкент.
3. Кулешова Е.А., Светлов И.Л., Панкратов В.А., Монастырский В.П. Влияние температурно-скоростных параметров направленной кристаллизации на фазовый состав и дисперсность структуры никелевых сплавов/Тезисы докладов на I Всесоюзном симпозиуме "Жаростойкие и жаропрочные металлические материалы". Звенигород, 1989, с 56.
4. Монастырский В.П., Качанов Е.Б. Конкурентный рост ГЦК-монокристаллов с различной кристаллографической ориентацией в нестационарном поле температур/Тезисы докладов на I Уральской школе по росту кристаллов металлов и интерметаллидов из расплава. Свердловск, УПИ, 1990.
5. Кулешова Е.А., Монастырский В.П., Панкратов В.А., Хлыстов Е.Н., Родионов Д.П., Виноградова Н.И. Взаимосвязь дисперсности микроструктуры ГЦК-кристаллов с их

- кристаллографической ориентацией/Тезисы докладов на I Уральской школе по росту кристаллов металлов и интерметаллидов из расплава. Свердловск, УПИ, 1990.
6. Монастырский В.П., Махлис М.Л. Подсистема моделирования и оптимизации процесса затвердевания сложных отливок в САПР ТП/Тезисы доклада на Научно-техническом семинаре "Механика и технология машиностроения". Свердловск, УПИ, 1990.
 7. Монастырский В.П., Качанов Е.Б., Наумов М.И. Математическая модель конкурентного роста столбчатых зерен при направленной кристаллизации многокомпонентного расплава//Кристаллизация и компьютерные модели./Труды IV Всесоюзной конференции по проблемам кристаллизации сплавов и компьютерного моделирования, Ижевск, 16-18 окт.1990 г. -Ижевск, УдГУ, 1991, с.10-24.
 8. Монастырский В.П., Качанов Е.Б., Наумов М.И. Исследование и оптимизация процесса направленной кристаллизации отливок из жаропрочных сплавов с помощью ППП НК-2/Тезисы доклада на V Международной научно-технической конференции "Кристаллизация и компьютерные модели". Ижевск, УдГУ, 1992.
 9. S.U.An, V.Monastyrskiy, E.Monastyrskaya, et al. The Thermal Analysis of the Mushy Zone and Grain Structure Changes During Directional Solidification of Superalloys/Proceedings of the Ninth International Symposium on Superalloys//Superalloys 2000. September 17-21, 2000, Seven Springs, PA., pp. 247-255.
 10. Монастырский В.П., Монастырская Е.В. Комплекс программ *CASTXX^{3D}* для моделирования теплофизических процессов в материаловедении и металлургии/Тезисы доклада на международной научно-практической конференции "Автоматизированный печной агрегат - основа энергосберегающих технологий металлургии XXI века. Москва, МИСиС, 2000, с.
 11. V.P.Monastyrskii, Yu.A.Zeigarnik, "Inverse Heat Conduction Problem for Analysis of Directional Solidification Experimental Data", (*Proceedings of IHTC12*. Grenoble, 2002), 243-248.
 12. Монастырский В.П., Поклад В.А., Оспенникова О.Г., Рудницкий С.В. Опыт ММПП «САЛЮТ» по применению CAD и CAE систем в опытном производстве литых заготовок деталей газотурбинных двигателей/Тезисы доклада на III Международной научно-практической конференции "Прогрессивные литейные технологии". Москва, МИСиС, 2005, с.126-128.
 13. Монастырский В.П., Оспенникова О.Г., Рудницкий С.В. Опыт применения и перспективы развития систем автоматизированного моделирования литейных процессов в опытном производстве деталей ГТД/Тезисы доклада на Всероссийской научно-практической конференции "Новые материалы и технологии НМТ-2006», т.1, Москва, МАТИ, 2006, с.38-39.
 14. Монастырский В.П. Теплофизические основы получения естественных композиционных материалов в металлических системах/Труды 5-й Московской Международной конференции «Теории и практика технологии производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов (ТПКММ). 2007. Москва.
 15. V.P.Monastyrskiy, I.L.Koynov. Experience of industrial application of commercial software for casting processes simulation/Recent development of modeling of casting and solidification processes// Proceedings of the 7th Pacific Rim International Conference on Modeling of Casting and Solidification Processes. 2007, Dalian. China. pp.671-678.
 16. В.А.Поклад, О.Г.Оспенникова, С.В.Рудницкий, Монастырский В.П. CALS-технологии в производстве особо ответственных литых деталей из жаропрочных никелевых сплавов и высокопрочных сталей/Российская энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение. Гл. ред. А.Г.Братухин. М.: ОАО НИЦ АСК, 2008, 410-415

17. V. P. Monastyrskiy. Modeling of Porosity Formation in Ni-based Superalloys/ Proceedings of the 8th Pacific Rim International Conference on Modeling of Casting and Solidification Process (MCSP8-2010), Edited by Jeong-Kil Choi, 2010, pp.89-85.
18. V.P.Monastyrskiy. Modeling and Numerical Optimization of Withdrawal Rate in a Directional Solidification Process//IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **33** (2012) 012023.

По теме диссертации получено авторское свидетельство СССР №1577170, а также свидетельства о регистрации электронного ресурса (программные модули и комплексы программ для ЭВМ) №№18141, 18142, 18143, 18144, 18145 Объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование» Российской академии образования.

Монастырский Валерий Петрович

«Развитие научных основ моделирования кристаллизации отливок с направленной и равноосной структурой». Автореферат Диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, МГМУ (МАМИ), 44 с.

Подписано в печать

Заказ №

Тираж экз.

Усл. печ. л.

Усл. изд. л.

Бумага типографская

Формат 60х90 1/16

МГМУ (МАМИ), 107023, г.Москва, Б.Семеновская ул., 38.

