

На правах рукописи



Дубровская Александра Сергеевна

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ОТЛИВОК ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ
ТОЧНОГО ЛИТЬЯ**

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Труфанов Николай Александрович

Официальные оппоненты: Дмитриев Сергей Владимирович, доктор
физико-математических наук, заведующий
лабораторией «Нелинейные явления и
дефектные структуры в кристаллах»
Института проблем сверхпластичности
металлов РАН

Барышников Михаил Павлович, кандидат
технических наук, профессор кафедры
машиностроительных и металлургических
технологий ФГБОУ ВПО «Магнитогорский
государственный технический университет
им. Г.И. Носова»

Ведущая организация: ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А.
Благонравова РАН», г. Москва

Защита диссертации состоится 22 сентября 2015 г. в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.188.08 при ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д.29, ауд. 423.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Пермского национального исследовательского политехнического университета (<http://pstu.ru/>).

Автореферат разослан 03 июля 2015 г.

Учетный секретарь
диссертационного совета



Алексей Игоревич Швейкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одной из важнейших задач математического моделирования является комплексное исследование современных процессов машиностроительной промышленности и создание экономически эффективных инновационных производственных технологий, позволяющих не только сберечь дорогостоящие сырьевые, энергетические и трудовые ресурсы, но и повысить качество изготавливаемых деталей и минимизировать производственный брак. Процесс изготовления отливок деталей газотурбинных двигателей (ГТД) методом литья по выплавляемым моделям связан с протеканием ряда сложных взаимосвязанных физических явлений. Применение математического моделирования процессов изготовления деталей методом точного литья, позволяет снизить затраты, поскольку отработка конструкции литниковой системы и температурно-временных параметров технологического процесса ведется не на реальных дорогостоящих плавках, а путем многовариантных численных исследований. Низкая стоимость и короткие сроки выполнения компьютерного эксперимента, а также большой объем и наглядность полученной информации о ходе технологического процесса и качестве будущей отливки делают компьютерное моделирование важнейшим инструментом исследования.

В настоящее время при построении математических моделей, применяемых для изучения процессов литья, используют комплексный подход, объединяющий в себе ряд различных дисциплин: термодинамику, гидродинамику, теорию тепломассопереноса, теорию фазовых превращений, механику твердого тела и жидкости. Построению математических моделей, описывающих отдельные стороны литейного процесса, посвящены работы К. Беккермана, В.Т. Борисова, Д.А. Дантзига, В.А. Денисова, В.М. Голода, Г.П. Иванцова, З.К. Кабакова, Е.Н. Каблова, Дж. Кэмпбела, А. Людвиг, А.В. Монастырского, В.П. Монастырского, М. Рапа, Ф. Тево, М.Д. Тихомирова, А.И. Цаплина, Дж. У. Чана и других. Несмотря на значительные достижения в области математического моделирования литья, имеется потребность в развитии комплексного всестороннего подхода к исследованию конкретных литейных процессов для эффективного применения описанных моделей в промышленных условиях. Существенное отставание в развитии математических моделей состоит в их недостаточной опытной верификации, в частности для процессов литья деталей из современных жаропрочных суперсплавов при высоких температурах. Исследования в лабораторных условиях на модельных сплавах не позволяют получить необходимую информацию для выбора достаточно полной математической модели процесса изготовления отливок деталей ГТД. В теоретических исследованиях часто допускаются гипотезы и упрощения, не позволяющие учесть всю многофакторность производственного процесса, и опускаются параметры, играющие важнейшую роль при изготовлении отливки. Поэтому задача

выбора, адаптации и исследования полной многофакторной модели процесса изготовления отливок деталей ГТД, ее верификации и апробации в опытном производстве является актуальной.

Цель работы: комплексные исследования с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента процессов изготовления отливок деталей ГТД методом точного литья и внедрение компьютерного моделирования в сквозную "цепочку" технологической подготовки литейного производства.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Осуществить техническую и математическую постановки проблемы исследования закономерностей протекания термомеханических и структурно-кинетических процессов при изготовлении отливок деталей ГТД методом точного литья.

2. Выполнить анализ существующих подходов и методов математического и компьютерного моделирования процессов литья и выбрать наиболее эффективные.

3. Провести обоснование и тестирование вычислительных методов с применением современных наукоемких компьютерных технологий для численных моделей точного литья и сопутствующих процессов.

4. Произвести проверку адекватности математических моделей с помощью натуральных экспериментов на опытном производстве деталей ГТД с применением новейших средств диагностики технологического процесса и методов неразрушающего контроля.

5. Провести комплексные исследования научных и технологических проблем, связанных с производством деталей методом литья с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

6. Осуществить внедрение разработанных математических моделей и вычислительных методов в аппарат разработки технологии производства деталей ГТД методом точного литья.

Методы исследований основаны на использовании математического моделирования, методов теории тепломассообмена с фазовыми переходами, механики сплошных сред и вычислительных технологий, реализация алгоритмов решения задач выполнена средствами программных сред ProCast, UnigraphicsNX.

Научная новизна:

1. Создана компьютерная модель для численного исследования многофакторного процесса изготовления отливок деталей ГТД из жаропрочных никелевых сплавов методом литья по выплавляемым моделям.

2. Впервые проведена адаптация и многосторонняя верификация комплексной математической модели процесса изготовления отливок из жаропрочных сплавов на основе уникальных данных натуральных экспериментов на ОАО «Авиадвигатель».

3. Проведено комплексное многопараметрическое исследование технологических проблем литейного процесса и образования возможных дефектов в процессе затвердевания с применением современных численных методов и алгоритмов и получены следующие новые научные результаты:

- для процесса изготовления монокристаллических образцов предложен общий вид коэффициента теплопередачи между керамической формой и жаропрочным никелевым сплавом;
- на основе численного исследования процесса изготовления монокристаллических образцов предложен метод оптимизации скорости выдвижения образцов из печи, при котором значительно увеличивается температурный градиент, что повышает качество монокристалльного литья;
- создана численная модель прогнозирования усадочной пористости в теле отливки корпуса воздухоочистителя для ГТД, изготавливаемого методом литья по выплавляемым моделям. Численное исследование усовершенствованных моделей литниково питающих систем (ЛПС) позволило выявить вариант с подпиткой отливки через нижнюю часть формы, использование которого обеспечивает устранение дефекта в виде усадочной пористости в теле отливки;
- на основе численных экспериментов по подбору технологических параметров процесса кристаллизации блочной сопловой лопатки предложены рекомендации изменения времени слива сплава и температуры прогретой формы, которые позволили более чем в два раза сократить коробление и привести разнотолщинность пера по корыту и спинке в поле допуска.

Достоверность результатов подтверждается удовлетворительным соответствием численных расчетов полей температур в процессе кристаллизации, пористости в отливке, геометрических параметров коробления лопаток результатам диагностики реальных отливок с помощью современных методов неразрушающего контроля.

Практическая ценность работы. Результаты работы успешно внедрены в сквозную цепочку технологической подготовки литейного производства отливок деталей ГТД на предприятии ОАО «Авиадвигатель» г. Пермь. Применение математического моделирования позволило существенно сократить производственные расходы при разработке литейной оснастки. Проведение отработки технологических параметров литейного процесса и габаритов ЛПС на основе численных экспериментов привело к значительному снижению брака и сокращению времени общего цикла подготовки технологического процесса литья новых деталей, что подтверждено справкой о внедрении результатов диссертационной работы.

На защиту выносятся:

1. Компьютерная модель для численного исследования многофакторного процесса изготовления отливок деталей ГТД из жаропрочных никелевых сплавов методом литья по выплавляемым моделям.

2. Результаты верификации комплексной математической модели процесса изготовления отливок из жаропрочных сплавов на основе уникальных данных натуральных экспериментов на ОАО «Авиадвигатель».

3. Новые результаты комплексного исследования процесса изготовления отливок деталей ГТД, проведенные с использованием современных и эффективных методов математического и численного моделирования.

4. Рекомендации по внедрению математического моделирования литейных процессов в цепочку технологической подготовки производства.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XX-XXI Всероссийской школе – конференции молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках» (Пермь, ПНИПУ, 2011-2012); I Международной научно – практической конференции «Инновационные процессы исследовательской и образовательной деятельности» (Пермь, ПНИПУ, 2012); Международной научно – технической конференции «Проблемы разлива и кристаллизации стали, сварки, термообработки» (Москва, ЦНИИТМАШ, 2012); III Международном Симпозиуме «Computer Simulation of Solidification, Casting and Refining» (Стокгольм, Швеция, Королевский технический университет – Хельсинки, Финляндия, университет Алто, 2013); международном пользовательском форуме «ESI Global Forum 2014» (Париж, Франция, ESI group, 2014); IV международной конференции «International Conference on Advances Solidification Processes» (Виндзор, Великобритания, Брунельский университет, 2014), XIV международной конференции «Modelling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes» (Остров Авадзи, Хего, Япония, Осацкий университет – Киотский университет, 2015). Полностью работа доложена и обсуждена на семинарах кафедры ВМиМ ПНИПУ (рук. профессор Н.А. Труфанов), Института механики сплошных сред УрО РАН (рук. академик РАН В.П. Матвеев), кафедры ММСП ПНИПУ (рук. профессор П.В. Трусков), кафедры МКМК ПНИПУ (рук. профессор Ю.В. Соколкин).

Публикации. Результаты диссертационного исследования представлены в 16 научных статьях, в том числе 4 работы опубликованы в ведущих рецензируемых научных изданиях (из них 1 издание включено в базы цитирования Scopus и Web of Science), 1 статья в издании, включенном в базу цитирования Scopus. Получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 103 наименований и трех приложений. Общий объем работы – 152 страниц машинописного текста, в том числе 139 страницы основного текста, содержащего 97 иллюстраций и 8 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы. Сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна работы и положения, выносимые на защиту. Приведено краткое описание содержания диссертационной работы по главам.

Первая глава посвящена анализу современного состояния проблемы математического моделирования литейных процессов. Приводится краткое описание процесса производства отливок деталей ГТД из жаропрочного сплава методом литья по выплавляемым моделям. Вводятся основные понятия и определения, используемые при формулировке математической модели. Выполняется сравнительный обзор моделей и гипотез, применяемых для описания многофакторного литейного процесса, обсуждается наиболее полная модель для численных исследований. Проводится сравнительный анализ пакетов прикладных программ, предназначенных для моделирования литейных процессов: ProCAST, MagmaSoft, ПОЛИГОН и LVMFlow, с указанием основных достоинств и недостатков. По результатам данного анализа осуществлен выбор оптимального программного продукта как основы для моделирования процесса изготовления отливок деталей ГТД методом точного литья.

Вторая глава посвящена разработке и проверке адекватности математической модели для исследования процесса изготовления монокристаллических образцов. Строится математическая модель изготовления блоков образцов методом точного литья. Численная модель описывает процесс заливки металлического расплава в форму и его последующее затвердевание.

На рисунке 1 изображена обобщенная схема изготовления полый отливки, включающая керамическую форму, стержень, и область формирования отливки.

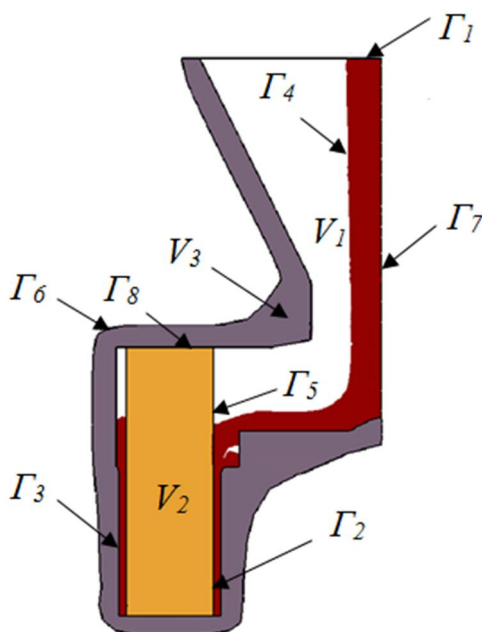


Рис. 1. Схематическое изображение процесса изготовления отливки изделия методом точного литья, где V_1 – область тела отливки, V_2 – стержень, V_3 – форма, Γ_1 – граница для заливки металла, Γ_2 – граница контакта стержня и металла, Γ_3 – граница контакта металла и формы, Γ_4 – свободная поверхность металла, Γ_5 – свободная поверхность стержня, Γ_6 – свободная поверхность формы, Γ_7 – плоскость симметрии

Связанные процессы тепломассопереноса в расчетной области при заливке металла и кристаллизации отливки изучаются на основе совместного решения уравнения энергии и уравнений движения. Дифференциальное уравнение энергии в области, заполненной металлом, имеет вид:

$$r_1 \frac{\partial H_1}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} + r_1 \bar{U} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\hat{I}_1 \cdot \nabla T) \quad \bar{x} \in V_1, \quad (1)$$

где энтальпия определена согласно соотношению:

$$H_1(T) = \int_0^T c_{p1}(T) dT + L[1 - g_s(T)], \quad (2)$$

для остальных расчетных областей:

$$r_i \frac{\partial H_i}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\hat{I}_i \cdot \nabla T) \quad \bar{x} \in V_i, \quad (3)$$

где энтальпия определяется как:

$$H_i(T) = \int_0^T c_{pi}(T) dT. \quad (4)$$

В соотношениях (1)-(4) T – температура; t – время; ρ – плотность материала; c_p – удельная теплоемкость; L – удельная теплота фазового перехода; $\hat{I} = \hat{I}(T)$ – тензор коэффициентов теплопроводности; $\bar{U} = (u_1, u_2, u_3)$ – вектор эффективной скорости расплава, рассчитываемый через истинную скорость жидкой фазы \bar{U}_l следующим образом: $\bar{U} = g_l \cdot \bar{U}_l$; g_l – относительная доля жидкой фазы; g_s – относительная доля твердой фазы $g_s = 1 - g_l$; $\bar{x} = (x_1, x_2, x_3)$ – радиус-вектор в декартовой фиксированной системе координат, $i = 2, 3$.

Для моделирования заливки расплава в керамическую форму и расчета тепломассопереноса используется дифференциальное уравнение движения с дополнительным слагаемым, учитывающим сопротивление дендритного каркаса течению расплава в двухфазной области. В области отливки рассматривается неизотермическое ламинарное течение ньютоновской вязкой жидкости с учетом зависимости вязкости от температуры. Граница раздела фаз явным образом не выделяется. При данных предположениях уравнение движения имеет вид:

$$r_1 \frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + (r_1 \bar{U} \cdot \nabla) \bar{U} = -\nabla p + \nabla \cdot (2m\hat{D} + m_v(\nabla \cdot \bar{U})\hat{I}) + r_1 \bar{g} - \frac{m}{K} \bar{U}, \quad (5)$$

для $\bar{x} \in V_1$, \bar{g} – вектор воздействия внешних сил; p – давление; m – коэффициент сдвиговой вязкости; m_v – объемная вязкость; K – проницаемость дендритного каркаса, рассчитываемая по формуле Кармана-Козени: $K = g_l^3 / kS_V^2$, здесь $S_V = 6(1 - g_l) / R$ – удельная поверхность твердожидкой фазы, R – характерный размер дендрита, k – постоянная Кармана, $k=5$, \hat{D} – тензор скорости деформации, \hat{I} – единичный тензор.

Уравнение движения дополняется уравнением неразрывности сжимаемой среды в области жидкой фазы, для соблюдения закона сохранения массы:

$$\frac{\partial r_1}{\partial t} + \nabla \cdot (r_1 U) = 0, \quad \bar{x} \in V_1. \quad (6)$$

Уравнения дополняются соответствующими граничными и начальными условиями на поверхностях контакта и свободных поверхностях.

На основе сформулированной математической модели строится дискретная модель процесса изготовления монокристаллических образцов для механических испытаний. Эволюция температурных полей, полученная в результате численных экспериментов, сравнивается с данными опроса термодатчиков соответствующего натурального эксперимента, проведенного на ОАО «Авиадвигатель». Сделан вывод об удовлетворительном соответствии результатов расчета и данных эксперимента для керамической формы (расхождение не превышает 12°C), и недостаточно хорошем - для материала отливки (80°C).

Для уточнения математической модели предложена кусочно-линейная аппроксимация зависимости коэффициента теплопередачи между материалом формы и кристаллизующимся расплавом от температуры и получены параметры данной аппроксимации. С учетом внесения в модель описанных изменений получено удовлетворительное соответствие (расхождение составляет 14°C в форме и 11°C в металле) результатов расчета и данных эксперимента (рисунок 2). По результатам вычислительных экспериментов написаны методические указания по выбору рекомендуемых значений коэффициента теплопередачи для кристаллизующихся деталей ГТД, которые используются на предприятии ОАО «Авиадвигатель» по настоящее время.

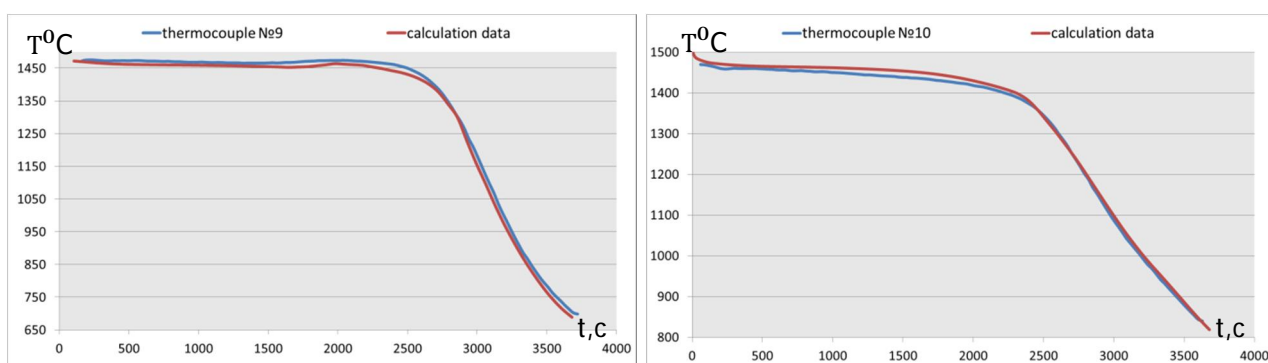


Рис. 2 Расчетные и экспериментально замеренные температурно-временные зависимости в керамической форме и отливке соответственно

На основании экспериментально подтвержденной математической модели проведена температурно-скоростная оптимизация процесса изготовления монокристаллических образцов. Создана специальная пользовательская функция для пакета ProCAST с целью оптимизации скорости выдвижения отливок из печи. Применение данной

пользовательской функции позволило получить зависимость скорости выдвижения образцов из печи от времени на основе решения температурной задачи. Использование полученной зависимости позволяет повысить качество монокристаллического литья.

На основании результатов математического моделирования обоснованы и реализованы новые производственно-технические решения: улучшена конструкция печи путем установки дополнительных торцевых нагревателей для получения равномерных температурных полей.

Третья глава посвящена проверке адекватности математической модели для прогнозирования макроструктуры будущей отливки. Для этого проводится численное моделирование процесса формирования макроструктуры рабочих лопаток турбины низкого давления.

Математическая модель зародышеобразования и роста дендритов формулируется на основе стохастических соотношений М. Раппа. Зародышеобразование считается случайным и подчиняется закону нормального распределения Гаусса. Учитываются кинетика и предпочтительное направление роста дендритов. Конечная плотность зерен определяется в виде:

$$n(\Delta T) = \frac{n_{\max}}{\sqrt{2p} \cdot \Delta T_s} \int_0^{\Delta T(t)} \exp\left(-\frac{(\Delta T(t) - \Delta T_n)^2}{2\Delta T_s^2}\right) d(\Delta T(t)), \quad (7)$$

где n – конечная плотность зерен, ΔT – величина переохлаждения, ΔT_s – среднее квадратичное отклонение, n_{\max} – максимальная плотность образования ядер, ΔT_n – математическое ожидание. Состояние ячейки, в которой образовался зародыш зерна, меняется с жидкого на твердожидкое. В ее центре задается скорость роста зерна v как функция переохлаждения:

$$n(\Delta T) = a_2 \Delta T^2 + a_3 \Delta T^3, \quad (8)$$

где a_2 и a_3 – константы размерностью $m \cdot c^{-1} \cdot K^{-2}$ и $m \cdot c^{-1} \cdot K^{-3}$. В качестве основы для моделирования формирования макроструктуры используется решение задачи тепломассообмена (1)–(6).

С целью верификации комплексной математической модели процесса изготовления отливок из жаропрочных сплавов в части прогнозирования макроструктуры использованы экспериментальные данные натуральных экспериментов на ОАО «Авиадвигатель» (рисунок 3).

Получено удовлетворительное соответствие результатов математического моделирования макроструктуры рабочей лопатки турбины низкого давления (ТНД) с картинками макроструктуры после химического травления. В ходе численного моделирования на пере лопатки спрогнозировано появление глобулярной мелкодисперсной структуры, на кромке выявлена направленная столбчатая структура. Установлено качественное совпадение характера макроструктуры отливки и визуальное соответствие размеров зерен.

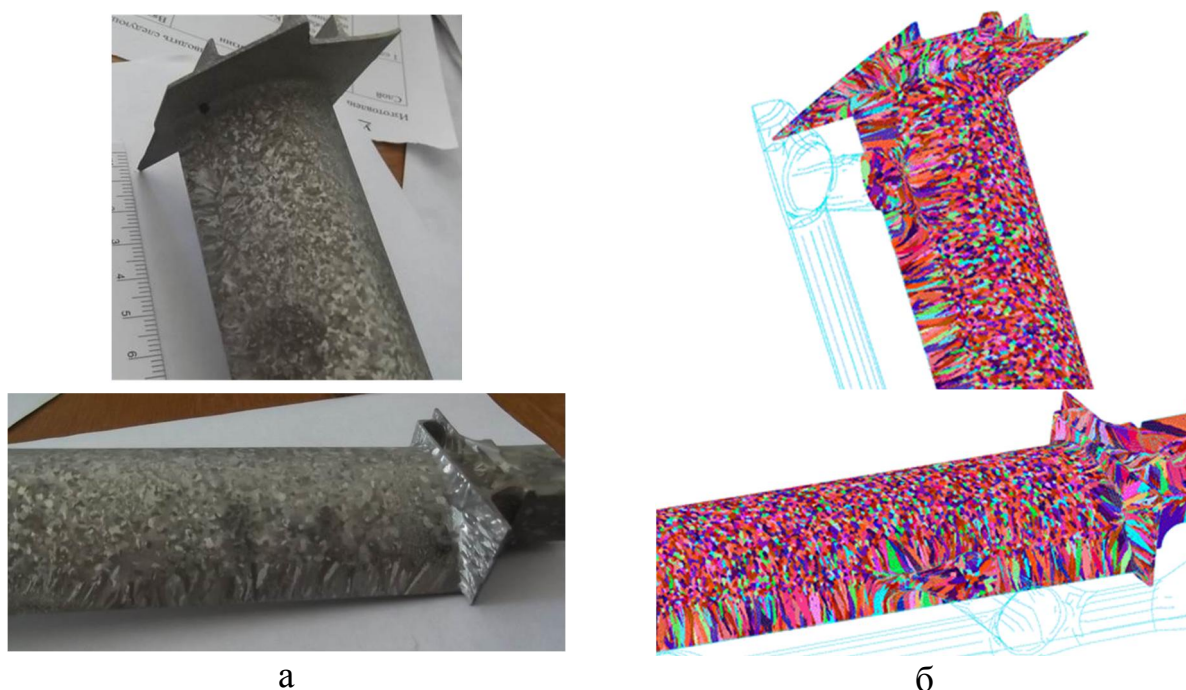


Рис. 3. Сравнение макроструктуры рабочей лопатки после химического травления с результатами численного моделирования; а) – реальная макроструктура рабочей лопатки; б) – макроструктура, полученная с помощью численного моделирования

В четвертой главе описывается математическая модель для прогнозирования возможной усадочной пористости в отливке детали корпуса воздухоочистителя на основе решения задачи тепломассообмена (1)–(6). Модель дополняется законом сохранения массы для кристаллизующегося расплава, записанным в виде

$$\nabla \cdot \left(r_l \frac{K}{m_l} (\nabla p_l - r_l \bar{g}) \right) + r_l \frac{\partial g_p}{\partial t} = \frac{\partial \langle r_1 \rangle}{\partial t}, \quad (9)$$

где r_l – плотность жидкого расплава, p_l – давление, действующее на фронте ликвидус, m_l – вязкость расплава, K – проницаемость дендритного каркаса, $\langle r_1 \rangle$ – осредненная плотность, g_p – величина относительного содержания пор. На границе контакта кристаллизующегося расплава с окружающей средой справедливо:

$$p_l(x) = p_{ext} + p_l g(z_{ext} - z), \quad (10)$$

где z_{ext} – координата свободной поверхности, на которую действует давление p_{ext} , z – соответствующая координата изотермы ликвидус.

В случае закрытого жидкого кармана, когда не происходит никакой подпитки, макропора образуется в области с минимальным давлением, при этом на условной границе раздела фаз Γ_r справедливо равенство

$$p_l = p_c, \quad (11)$$

где p_c – кавитационное давление в расплаве.

В случае частично закрытого металлического кармана, когда к кристаллизующейся области осуществляется приток расплава давление на условной границе раздела фаз Γ , можно представить как сумму:

$$p_l(x) = p_{lz_0} + p_l \bar{g}(z_0 - z), \quad (12)$$

где p_{lz_0} – давление, приложенное к границе кармана с координатой z_0 .

Для проверки комплексной математической модели процесса изготовления отливок из жаропрочных сплавов выполнено сравнение результатов численного моделирования усадочной пористости в теле отливки корпуса воздухоочистителя и данных рентгеноскопии дефектов в реальной отливке, произведенной на ОАО «Авиадвигатель». Результаты математического моделирования качественно верно предсказывают место и характер формирования дефекта (рисунок 4).

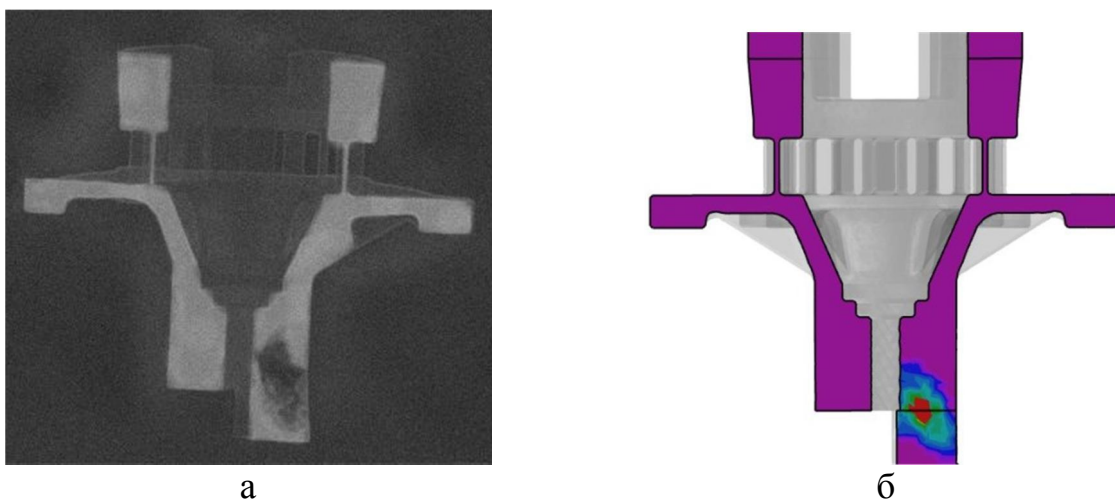


Рис. 4. Усадочная пористость а) – в реальной отливке, выявленная с помощью рентгеновского томографа, б) – полученная с помощью математического моделирования

Численное исследование на основе математического моделирования усовершенствованных моделей ЛПС позволило выявить вариант с подпиткой отливки через нижнюю часть формы, использование которого обеспечивает устранение дефекта в виде усадочной пористости в теле отливки. Это привело к значительному снижению брака и сокращению времени общего цикла отработки технологического процесса литья новых деталей.

Пятая глава посвящена верификации математической модели с точки зрения прогнозирования коробления будущей отливки. Проведено численное моделирование параметров коробления при кристаллизации блока сопловых лопаток. Сформулирована контактная вязкоупругопластическая задача для описания напряженно-деформированного состояния в отливке в процессе остывания, включающая уравнения равновесия для $\bar{x} \in V_i$, где $i = 1, 2, 3$:

$$\nabla \cdot \mathcal{S} = 0. \quad (13)$$

где \mathcal{S} – тензор напряжений.

Используются геометрические соотношения теории малых деформаций (деформации в отливке не превышают 5%):

$$\hat{\epsilon} = \frac{1}{2} [\nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T]. \quad (14)$$

где $\hat{\epsilon}$ – тензор полной деформации, а \bar{u} – вектор перемещений.

Полная деформация определяется следующим образом:

$$\hat{\epsilon} = \hat{\epsilon}^{el} + \hat{\epsilon}^{vp} + \hat{\epsilon}^{th} + \hat{\epsilon}^{tr}, \quad (15)$$

где $\hat{\epsilon}^{el}$ – упругая, $\hat{\epsilon}^{vp}$ – вязкопластическая, $\hat{\epsilon}^{th}$ – температурная и $\hat{\epsilon}^{tr}$ – вызванная структурными усадками вследствие фазовых переходов в отливке составляющие тензора деформации, которые определяются как:

$$\hat{\epsilon}^{th} = \hat{a}(T - T_0), \quad \hat{\epsilon}^{tr} = \frac{b_{tr}}{3} g_s(\bar{x}, t) \hat{I}, \quad \hat{\epsilon}^{vp} = \frac{3 e_{eq}^{vp}}{2 S_{eq}} (S - S\hat{I}), \quad \hat{\epsilon}_{eq}^{vp} = \frac{1}{m} \left\langle \frac{S_{eq}}{S^*} - 1 \right\rangle^p,$$

m – вязкость материала, S^* – предел текучести, S_{eq} – эквивалентные напряжения по Мизесу, b_{tr} – коэффициент усадки, g_s – доля твердой фазы, p – коэффициент чувствительности к скорости деформации.

Физические отношения можно записать в виде:

$$S = {}^4\hat{R} \cdot \hat{\epsilon}^{el} = {}^4\hat{R} \cdot (\hat{\epsilon} - \hat{\epsilon}^{th} - \hat{\epsilon}^{vp} - \hat{\epsilon}^{tr}). \quad (16)$$

где ${}^4\hat{R}$ – тензор упругих констант четвертого ранга.

Уравнения (13)-(16) замыкаются граничными условиями, в том числе контактными на границах контакта отливки с формообразующими элементами. Температурные поля в процессе заливки и кристаллизации описываются соотношениями (1)-(6).

В целях верификации комплексной математической модели процесса изготовления блока полых сопловых лопаток произведено сравнение результатов математического моделирования коробления при кристаллизации блока с результатами замеров коробления реальной отливки, выявленного методом бесконтактного лазерного трехмерного сканирования (рисунок 5).

Получено удовлетворительное соответствие результатов. Характер полученных в результате моделирования короблений соответствует реальному отклонению геометрии лопатки от конструкторской модели. В частности подтверждено смещение стержня на одну из стенок пера.

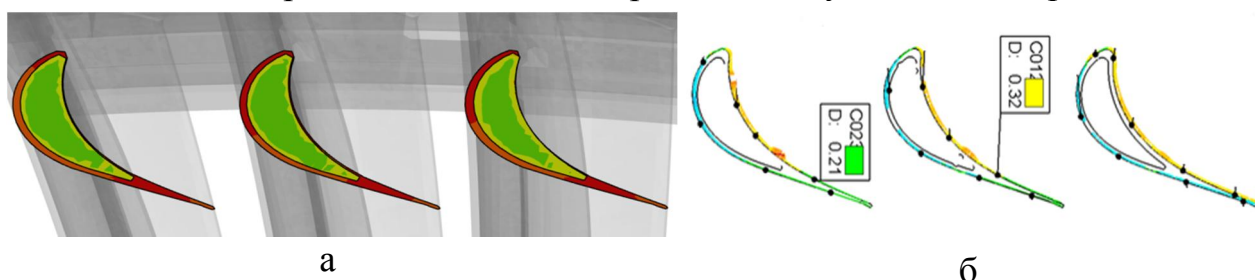


Рис. 5. Характерное смещение стержня к корыту пера отливки:
а) – результаты численного моделирования (увеличенные в 5 раз);
б) результаты обмера реальной отливки, мм

На основе численных экспериментов по подбору технологических параметров процесса кристаллизации блочной сопловой лопатки предложены уточнения времени слива сплава и температуры прогретой формы, что позволило более чем в два раза уменьшить коробление и привести разнотолщинность пера в поле допуска.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для исследования многофакторного процесса изготовления отливок деталей ГТД из жаропрочных никелевых сплавов методом литья по выплавляемым моделям средствами программной среды ProCast создана компьютерная модель.

2. Произведена многосторонняя верификация комплексной математической модели процесса изготовления отливок из жаропрочных сплавов на основе экспериментальных данных натуральных экспериментов на ОАО «Авиадвигатель» и получено удовлетворительное соответствие:

- результатов математического моделирования температурных полей при заливке и кристаллизации металла в процессе изготовления монокристаллических образцов и результатов термометрирования технологического процесса изготовления монокристаллических образцов;
- результатов моделирования усадочной пористости в теле отливки корпуса воздухоочистителя и данных рентгеноскопии дефектов в реальной отливке;
- результатов выявления макроструктуры рабочей лопатки турбины низкого давления после химического травления с результатами компьютерного моделирования макроструктуры лопатки;
- результатов математического моделирования коробления при кристаллизации блока сопловых лопаток с результатами замеров коробления реальной отливки, выявленного методом бесконтактного лазерного трехмерного сканирования.

3. С использованием численного моделирования проведено комплексное многопараметрическое исследование технологических проблем литейного процесса и образования возможных дефектов в процессе затвердевания с применением современных методов и алгоритмов и получены следующие новые результаты:

- для процесса изготовления монокристаллических образцов предложен общий вид коэффициента теплопередачи между керамической формой и жаропрочным никелевым сплавом;
- создана численная модель прогнозирования усадочной пористости в теле отливки корпуса воздухоочистителя ГТД, изготавливаемого методом литья по выплавляемым моделям. Численное исследование усовершенствованных моделей ЛПС позволило выявить вариант с подпиткой отливки через нижнюю часть формы, использование которого обеспечивает устранение дефекта в виде усадочной пористости в теле отливки;

- на основе численных экспериментов по подбору технологических параметров процесса кристаллизации блочной сопловой лопатки предложены уточнения времени слива сплава и температуры прогретой формы, что позволило более чем в два раза уменьшить коробление и привести разнотолщинность пера в поле допуска.

4. На основании результатов математического моделирования обоснованы и реализованы новые производственно-технические решения: улучшена конструкция ППФ путем установки дополнительных торцевых нагревателей для получения равномерных температурных полей; проведена температурно-скоростная оптимизация процесса изготовления монокристаллических образцов.

5. Разработанные компьютерные модели внедрены в сквозную "цепочку" технологической подготовки литейного производства отливок деталей ГТД на предприятии ОАО «Авиадвигатель», что позволило существенно сократить производственные расходы при разработке литейной оснастки. Проведение отработки технологических параметров литейного процесса и габаритов литниково питающих систем на основе численных экспериментов привело к значительному снижению брака и сокращению времени общего цикла отработки технологического процесса литья новых деталей.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Дубровская А.С., Донгаузер К.А. Численное исследование влияния технологических и конструкционных параметров на процесс изготовления монокристаллических отливок деталей газотурбинных двигателей // Вестник ПГТУ. Прикладная математика и механика. – Пермь: Изд-во Перм. гос. тех. ун-та, 2011. – №9. – С. 81–102.

2. Дубровская А.С., Донгаузер К.А. Численный анализ эволюции напряженно-деформированного состояния кристаллизующихся лопаток турбин // Вестник ПГТУ. Механика. – Пермь: Изд-во Перм. гос. тех. ун-та, 2012. – №1. – С. 16 – 30.

3. Дубровская А.С. Моделирование процесса кристаллизации монокристаллических отливок деталей газотурбинных двигателей. / Тез. докл. XXI Всероссийской школы-конференции молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках» – Пермь, 2012. С 58-59.

4. Дубровская А.С. Анализ математических моделей, используемых при оценке напряженно-деформированного состояния литых деталей газотурбинных двигателей. / Тез. докл. XX Всероссийской школы-конференции молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках» – Пермь, 2011. С 27-28.

5. Дубровская А.С. Численный анализ затвердевания и формирования дендритной структуры лопатки турбины в процессе кристаллизации // Научно-технический вестник Поволжья. – Казань: 2012. – №6. – С. 219 – 222. (Журнал входит в Перечень ВАК).

6. Дубровская А.С., Донгаузер К.А., Труфанов Н.А. Математическое моделирование процесса литья деталей газотурбинных двигателей // Известия самарского научного центра РАН – Самара 2012. – Т. 14 №4-5 С 1368 – 1371. (Журнал входит в Перечень ВАК).

7. А.А. Иноземцев, В.А. Елисеев, К.А. Донгаузер, А.С. Дубровская. Моделирование формирования усадочных дефектов в кристаллизующихся отливках деталей газотурбинных двигателей // Тяжелое машиностроение – М.: 2013. №6-7 С 49 – 53. (Журнал входит в Перечень ВАК).

8. А.А. Inozemtsev, A.S. Dubrovskaya, K.A. Dongauzer, N.A. Trufanov. Numerical Simulation for Optimizing Temperature Gradients during Single Crystal Casting Process // ISIJ International, Vol. 54, №. 2, 2014 pp. 254–258. (Журнал входит в международные системы цитирования Web of Science, Scopus).

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014660110. Температурно-скоростная оптимизация / К.А. Донгаузер, Р.Н. Фасхутдинов, А.С. Дубровская - № 2014615543, заявл. 10.06.2014; опубл. 01.10.2014.

10. А.А. Inozemtsev, A.S. Dubrovskaya, K.A. Dongauser, N.A. Trufanov. Numerical Simulation of Cast Distortion in Gas Turbine Engine Components // IOP conference series: materials science and engineering, №84, 2015, 012039, 8p, doi: 10.1088/1757-899X/84/1/012039 (Журнал входит в международную систему цитирования Scopus).