

МОНАСТЫРСКИЙ АЛЕКСЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА
ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ФАСОННЫХ ОТЛИВКАХ
И ИХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ДЛЯ ГРАВИТАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ЛИТЬЯ**

Специальность 05.16.04 – Литейное производство

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва, 2011 г.

Работа выполнена в ГОУ ВПО «МАТИ» - Российском государственном технологическом университете имени К. Э. Циолковского на кафедре «Системы автоматизированного проектирования и технологии литейного производства».

Научный руководитель:

доктор технических наук

Смыков Андрей Федорович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Батышев Александр Иванович

кандидат технических наук, доцент

Гаранин Владимир Федорович

Ведущее предприятие: ОАО «ММП им. В.В. Чернышева» (г. Москва).

Защита состоится «24» марта 2011 года в 14 часов на заседании диссертационного Совета Д 212.110.05 при ГОУ ВПО «МАТИ» - Российском государственном технологическом университете имени К. Э. Циолковского, по адресу: 121552 Москва, ул. Оршанская, д. 3, аудитория № 523А, корп. А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке «МАТИ» - РГТУ имени К. Э. Циолковского.

Ваш отзыв на автореферат диссертации в одном экземпляре, заверенный печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Телефон для справок: 8 (499) 141-94-95.

Автореферат разослан « » февраля 2011 года.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Диссертационного Совета Д 212.110.05

к.т.н., доц. Палтиевич А.Р.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одной из главных задач развития научно-технического прогресса в промышленности является широкое использование систем компьютерного моделирования (СКМ) и автоматизированного проектирования (САПР) технологических процессов (ТП). Однако, в настоящее время, несмотря на всеобщую компьютеризацию отечественных предприятий, проектирование и отработка технологий получения фасонных отливок часто основываются на опыте практической работы технологов, сложившихся технологических традициях, использовании известных решений, а также трудоемком и металлоемком методе проб и ошибок.

Из литературных источников известно, что теории гидродинамических, тепловых, фазовых, диффузионных, фильтрационных, деформационных и других процессов, протекающих при затвердевании жидкого металла, достаточно хорошо разработаны. В общем виде решены многие ключевые задачи формирования отливки. Математической базой для описания этих процессов служат математические модели (ММ), разработанные методами математической физики.

Однако следует отметить, что ММ и их решения, корректно описывающие термические напряжения в затвердевающей и охлаждаемой литой заготовке, а тем более их расчетная автоматизированная реализация не нашли широкого отражения в отечественной литературе, что свидетельствует о недостатке работ по этой проблеме. С другой стороны, актуальность прогнозирования горячих и холодных трещин в фасонных отливках, а также их коробления вполне очевидна.

В связи с вышеизложенным, разработка метода расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) отливок и его автоматизированная реализация в апробированных отечественных СКМ ЛП является актуальной задачей.

Практическая значимость темы подтверждается её выполнением в рамках НИОКР 2007 г. на ФГУП «ММПП «Салют» (п. 2.1.1.2 «Разработка и внедрение программного модуля по расчету деформаций и напряжений в отливках»).

Цель работы Повышение эффективности технологической подготовки производства фасонных отливок, получаемых гравитационным литьем, путем разработки и внедрения метода автоматизированного моделирования НДС литых заготовок при их затвердевании и охлаждении с прогнозированием образования в них горячих и холодных трещин и коробления.

Для реализации данной цели в работе поставлены следующие основные задачи исследований:

- 1) На основе принципов механики деформируемого твердого тела разработать математическую модель термоупругопластической среды, позволяющую описать изменение НДС отливки в процессе ее затвердевания и охлаждения.
- 2) Разработать методику расчета напряжений и деформаций в элементах отливки и формы с учетом их контактного взаимодействия для технологий гравитационного литья.
- 3) Сформулировать критерий образования горячих и холодных трещин в отливках.
- 4) Разработать алгоритм и компьютерную программу расчета для моделирования НДС в фасонных отливках при их формировании с анализом возможного образования в них горячих и холодных трещин и коробления.
- 5) Проверить адекватность разработанной расчетной методики и компьютерной программы.
- 6) Осуществить экспериментальное определение теплофизических и механических свойств никелевых жаропрочных сплавов ЧС70-ВИ и ЧС88-ВИ в зависимости от температуры.
- 7) Провести производственное опробование разработанной программы с целью ее передачи в промышленную эксплуатацию.

Методы исследований

В работе применялись экспериментальные и расчетные методы исследования: дифференциальная сканирующая калориметрия, статические испытания на растяжение, математическое моделирование исследуемых процессов.

Научная новизна работы

1. Разработана математическая модель сплошной среды, включающая термоупругопластичную модель поведения материала и позволяющая определять величину термических напряжений сплава в процессе его кристаллизации и охлаждения.
2. Разработана методика расчета напряжений и деформаций, возникающих в фасонной отливке и элементах формы вследствие неоднородности температурных полей и контактного взаимодействия.
3. На основе теории наибольшей удельной потенциальной энергии формоизменения сформулирован критерий трещинообразования, позволяющий анализировать возможность разрушения материала отливки при изменении ее НДС.

4. Определены теплофизические и механические свойства жаропрочных сплавов на основе никеля ЧС70-ВИ и ЧС88-ВИ в диапазоне температур 20 °С ÷ 1400 °С.

Практическая значимость работы

1. Полученные результаты использованы для разработки алгоритмов программного модуля расчета НДС при формировании фасонных отливок, получаемых гравитационными методами литья, «Салют-D», который вошел в состав СКМ ЛП «ПолигонСофт».

2. С использованием программного модуля «Салют-D» разработаны технологии получения отливок из никелевых жаропрочных сплавов «Колесо рабочее ТНД» и «Лопатка рабочая 3-ей ступени» для ФГУП «ММПП «Салют».

3. На основании выполненных исследований созданы предпосылки разработки аналогичных программных модулей для других специальных методов литья (направленной кристаллизации, вакуумного всасывания и др.).

4. Результаты работы используются в учебном процессе («МАТИ»-РГТУ имени К.Э. Циолковского).

Производственное опробование

Результаты работы внедрены на предприятии ФГУП «ММПП «Салют», а так же используются в ООО «СиСофт Полигон Плюс».

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийских н.т.к. «Новые материалы и технологии» (г.Москва, 2006, 2010 г.г.), XV международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (г. Алушта, 2007 г.), Всероссийских н.п.к. «Применение ИПИ – технологий в производстве» (г. Москва, 2008, 2009 и 2010 г.г.), 8-ой Всероссийской с международным участием н.п.к. «Быстрозакаленные материалы и покрытия» (г. Москва, 2009 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 11 работ (из них 3 статьи в журнале «Литейное производство», входящий в список научных журналов ВАК).

Структура и объем работы

Диссертационная работа изложена на 146 страницах, состоит из введения, 4 глав, общих выводов, библиографического списка из 122 наименований российских и зарубежных источников, 4 приложений, 6 таблиц и 60 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена актуальность исследуемой проблемы, общая характеристика и цель работы, а также основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзорный анализ методов автоматизированного решения задач технологических процессов фасонного литья. Выполнена классификация САПР ТП в зависимости от подхода к автоматизации и используемых методов. Рассмотрены работы, посвященные системам синтеза ТП литья. Такие системы решают обратные задачи и привлекательны для производств с ограниченной номенклатурой, т.к. каждое программное обеспечение этих систем пригодно только для конкретного типа отливок. Процессы возникновения напряжений в фасонных отливках при их формировании системами синтеза не рассматриваются. Обзор же систем анализа показал, что применяемые в них ММ, построенные методами математической физики, позволяют использовать их для выполнения поставленных в работе целей и задач.

Литературный обзор методов описания НДС отливок и критериев горячеломкости показал, что российские системы анализа литейных процессов не обладают необходимыми ММ для корректного учета контактного взаимодействия отливка-форма. Критерии горячеломкости, как правило, носят общий теоретический характер и не могут быть использованы в расчетах.

На основании анализа литературных данных сформулирована цель и поставлены задачи исследований.

Во второй главе даны общая постановка и решение задачи разработки математической модели НДС фасонной отливки при ее кристаллизации и охлаждении. Рассмотрен процесс получения фасонных отливок методами гравитационного литья и факторы, которые следует учитывать при создании ММ: геометрия отливки и формы, их неравномерное остывание, контактное взаимодействие, тепловые и механические свойства.

Начало расчета напряженного состояния начинается с момента времени, когда сплав заполнил форму и находится в плотном контакте с ней. Предпола-

гается, что поля температур отливки и формы известны в каждый момент времени и не зависят от их НДС. При решении задачи не учитываются выделение тепла при деформации отливки, силы трения и гравитация.

Поведение материала отливки описывается уравнениями термоупругопластической среды, разработанными на основе созданной А.А. Ильюшиным теории малых упругопластических деформаций. Напряженное состояние отливки и формы в процессе остывания определяется тензором истинных напряжений Коши σ_{ij} . Упругие свойства заданы упругим модулем E , коэффициентом Пуассона ν , коэффициентом линейного температурного расширения α и зависят от температуры T . Среднее напряжение σ_0 рассчитывается по формуле:

$$\sigma_0 = \frac{1}{3} \left[\frac{E(T)}{1 - 2\nu(T)} \right] (\Theta - 3\alpha(T)\Delta T). \quad (1)$$

где Θ - относительное изменение объема при малых деформациях; ΔT - изменение температуры в частице.

Девииатор тензора напряжений S_{ij} в текущий момент времени τ коллинеарен разности между девииатором тензора полной деформации e_{ij} и тензором пластической деформации $e_{ij}^{(P)}$ (тензор пластической деформации совпадает со своим девииатором), т.е.:

$$S_{ij}(\tau) = D(e_{ij}(\tau) - e_{ij}^{(P)}(\tau)) \quad (2)$$

где D – коэффициент пропорциональности.

На рис. 1 изображено пятимерное пространство девииатора деформаций, введенное А.А. Ильюшиным, показывающее смысл выражения (2). В трансляционно изотропно упрочняющейся модели предполагается, что $e_{ij}^{(P)}$ - девииатор, соответствующий точке полной разгрузки O_R , и коэффициент D изменяются в зависимости от процесса деформирования и температуры T . Для случая одноосного растяжения, легко реализуемого в эксперименте, зависимость D от процесса деформирования может быть восстановлена по экспериментальным данным. Экспериментальная кривая $\sigma_u \sim \varepsilon_u$ аппроксимируется двухзвенной ломаной кривой (рис. 2). Функции $\varepsilon_u^0(T)$, $\sigma_u^0(T)$, $U_0(T)$ характеризуют зависимость механических свойств от температуры.

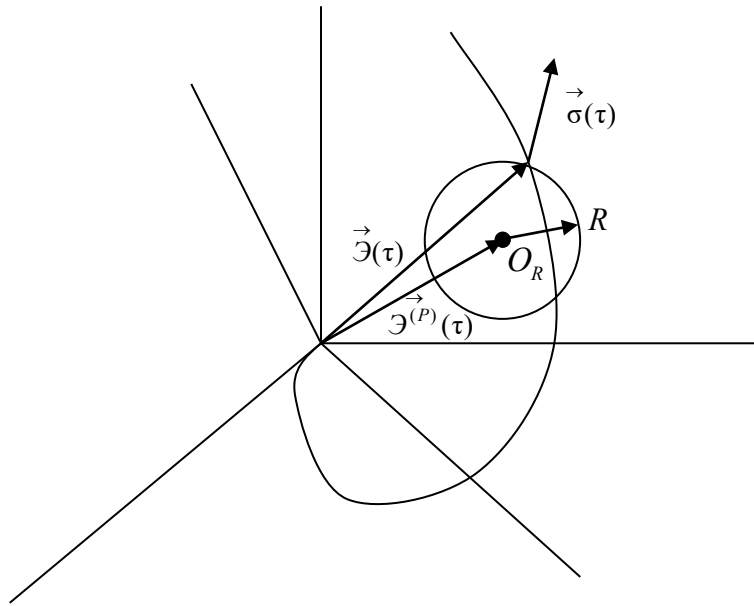


Рис. 1. Пятимерное пространство девиаторов тензоров деформаций

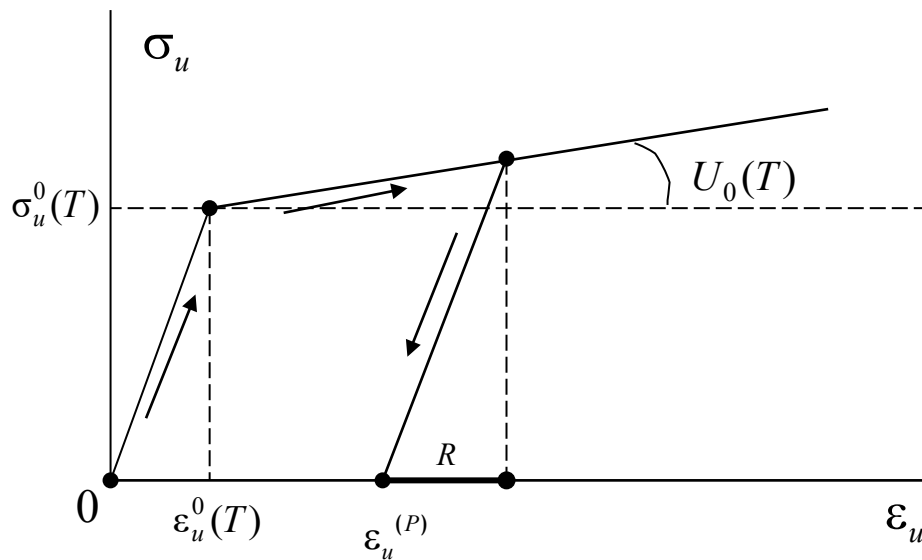


Рис. 2. Аппроксимация экспериментальной кривой $\sigma_u \sim \epsilon_u$

Если процесс деформирования в векторном пятимерном представлении продолжается в момент времени τ вне поверхности текучести, то коэффициент D определяется как:

$$D = \frac{2\mu(T)R + U_0(T)(\epsilon - R)}{\epsilon}, \quad (3)$$

где ϵ - интенсивность упругих деформаций; R – радиус поверхности текучести; μ - модуль сдвига.

Если же процесс деформирования в момент времени τ оказывается внутри поверхности текучести, то имеем:

$$D = 2\mu(T). \quad (4)$$

При учете контактного взаимодействия форма рассматривается как термоупругое (1) или абсолютно жесткое тело, или вообще отсутствует (т.е. не принимает участия в расчете).

Процесс остывания отливки и формы предполагается квазистатическим, и, следовательно, для любого момента времени в областях отливки D_1 и формы D_2 должны выполняться условия равновесия:

$$\sum_{i=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0, \quad i = 1, 2, 3, (x_1, x_2, x_3) \in D_\alpha, \alpha = 1, 2, \quad (5)$$

где для отливки (область D_1) зависимость напряжений σ_{ij} от компонент вектора перемещения и компонент тензора пластических деформаций описывается в соответствии с термоупругопластической моделью, представленной выше. Для формы (область D_2) принимается одна из трех принятых моделей. На поверхностях ∂D_1 и ∂D_2 (границы областей D_1 и D_2 соответственно) должны выполняться следующие условия:

$$\begin{aligned} \vec{u}(M) &= 0, \quad M \in \omega, \\ \vec{P}(M) &= 0, \quad M \in \Omega, \\ \vec{P}(M) &= 0, \quad M \in \gamma, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\vec{P}$ – вектор напряжений, определяемый по компонентам тензора напряжений; Ω – часть поверхности отливки, граничащей с внешней средой; ω – часть поверхности формы (или отливки), на которой заданы условия закрепления; γ – часть поверхности формы, не контактирующая с отливкой и не связанная условиями перемещения.

Если частицы отливки и формы контактируют друг с другом, то для них выполняется условие непроникновения (отливки в форму и наоборот) и равенство нулю вектора касательных напряжений:

$$\vec{u}_n(M) = 0, \vec{P}_\tau(M) = 0, M \in (\Gamma_1 \cup \Gamma_2), \quad (7)$$

где n – нормаль к поверхности контакта в точке M .

Если геометрический контакт между отливкой и формой частично нарушается, то для этих частей выполняется одно из условий (6):

$$\vec{P}_{\text{отл}} = 0, \vec{P}_{\text{ф}} = 0, \quad (8)$$

где $\vec{P}_{\text{отл}}$ и $\vec{P}_{\text{ф}}$ – векторы напряжений в точках отливки и формы соответственно.

Для реализации ММ, представленной системой уравнений (5-8), области отливки и формы разбиваем на конечные элементы в форме тетраэдров. Вершины тетраэдров являются узлами КЭ сетки. Установим глобальную нумерацию узлов и элементов, а также локальную нумерацию узлов тетраэдров и зададим соответствие локальных узлов конечных элементов глобальным узлам. Для выполнения условий равновесия (5) использован принцип виртуальных перемещений, согласно которому во всех внутренних узлах сетки и в граничных узлах, расположенных на свободных границах, обобщенные силы (9), приведенные к этим узлам, должны равняться нулю. Суммарная обобщенная сила, приведенная к некоторому глобальному узлу, вычисляется путем суммирования всех обобщенных сил, вычисленных в локальных узлах тетраэдров, примыкающих к этому глобальному узлу.

$$\begin{aligned} Q_x^{(\alpha)} &= \iiint_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij}^{\alpha, x} dV, \\ Q_y^{(\alpha)} &= \iiint_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij}^{\alpha, y} dV, \\ Q_z^{(\alpha)} &= \iiint_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij}^{\alpha, z} dV, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\alpha = A, B, C, D$ – вершины тетраэдра (рис. 2.3); $\delta \varepsilon_{ij}$ – виртуальные деформации, соответствующие виртуальным смещениям вершин элемента (тетраэдра); $dV = d\xi d\eta d\zeta$.

Для прогнозирования возможного разрушения материала отливки сформулирован критерий трещинообразования, основанный на теории наибольшей

удельной потенциальной энергии формоизменения. Для каждого глобального узла i вычисляется средняя интенсивность напряжений σ_{ui} , которая складывается из интенсивностей напряжений n локальных узлов, окружающих глобальный узел. Затем средняя интенсивность напряжений сравнивается с пределом прочности σ_v для текущей температуры T в узле i :

$$\sigma_{ui} = \frac{\sum_{j=1}^n \sigma_{uj}}{n} > \sigma_v(T), \quad (10)$$

где $\sigma_u = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}}$, $(i, j = x, y, z)$.

Если неравенство (10) выполняется, глобальный узел i отмечается как поврежденный, «треснувший» и напряжения, относящиеся к этому узлу, в дальнейшем не вычисляются, а приравниваются нулю, а пластические деформации остаются неизменными («замораживаются»).

Для реализации представленной расчетной методики на ПЭВМ разработан алгоритм расчета, обеспечивающий равенство нулю обобщенных сил, приведенных к узлам сетки. Для уравнивания сил в узлах используется итерационная процедура, в процессе которой производится смещение каждого узла i в направлении, противоположном вычисляемой обобщенной силе, приведенной к этому узлу:

$$u_i = -\beta \cdot Q_i, \quad (11)$$

где $i = x, y, z$; β - коэффициент пропорциональности.

Итерации проводятся до тех пор, пока максимальный модуль компонент обобщенных сил Q_{max} не становится меньше некоторой наперед заданной величины Q_{tol} , определяемой в зависимости от требуемой точности расчета:

$$Q_{max} = \max_i \{ |Q_x^i|, |Q_y^i|, |Q_z^i| \} < Q_{tol}. \quad (12)$$

где i – номер узла сетки.

По описанному алгоритму разработан программный модуль MECHMLD.exe на языке Microsoft Visual C++, вычисляющий обобщённые силы в локальных узлах тетраэдра и проводящий процедуру их минимизации.

В третьей главе проводится проверка адекватности разработанной математической модели и алгоритма ее реализации.

Проведены численные эксперименты по моделированию НДС в геометрической модели «лопатка ГТД» при разных условиях ее взаимодействия с формой (габариты и пропорции модели соответствуют реальной лопатке). Расчет тепловых полей, необходимых для вычислений тензора напряжений, проведен в СКМ ЛП «ПолигонСофт». Полученные результаты оценивались путем сравнения соответствующих расчетных полей с полями, рассчитанными в аналогичных условиях по модели STRESS системы ProCAST.

Для расчета температурных полей и внутренних температурных напряжений в отливке, использованы теплофизические и механические характеристики жаропрочного сплава на основе никеля Inconel718 из базы материалов СКМ ProCAST. Для расчета температурных полей керамической формы использованы теплофизические характеристики керамики на основе Al_2O_3 из того же источника. Заданные граничные условия соответствуют остыванию в воздушной среде, на границах отливка-форма заданы условия неидеального контакта.

В первом численном эксперименте определено НДС в отливке без учета влияния формы. Для исключения влияния керамической формы на формирование тепловых полей в отливке и, как следствие, на ее НДС, КЭ сетка формы удалена из расчетной области, а на всей поверхности отливки заданы условия теплообмена с окружающей средой. С помощью систем ProCAST и СКМ ЛП «ПолигонСофт» рассчитаны тепловые поля в отливке и форме для заданных условий. Результаты показывают, что расчет остывания отливки в обеих системах идентичен и температурные поля на последнем шаге расчета практически одинаковы. Это дает основание предположить, что расчет напряжений будет проводиться при равных условиях. Дополнительно, для расчета НДС без жесткой формы, заданы специальные условия закрепления в трех узлах отливки, чтобы исключить ее пространственные перемещения и повороты (рис. 3).

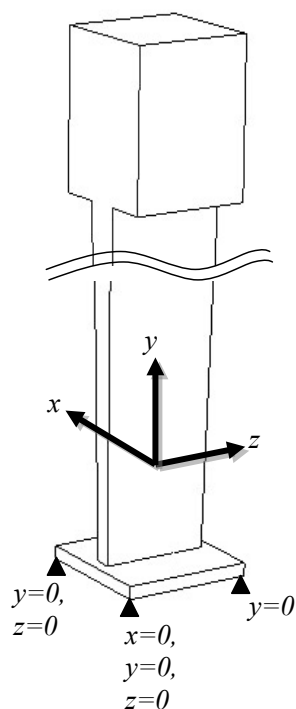


Рис. 3. Граничные условия ограничения перемещений
по координатным осям

Результаты расчета, полученные по разработанной модели, вполне ожидаемы (рис. 4, а). Закрепление трех узлов сетки на нижней грани «бандажной полки» вызывает смещение всей отливки к этой плоскости по вертикали и к жестко закрепленному узлу в направлении двух других осей. Поскольку остальные узлы отливки свободны в своих перемещениях, ее общая конфигурация остается почти без изменений, а уровень внутренних напряжений невисок. Результаты аналогичного расчета, полученные в системе ProCAST, неудовлетворительны. Отливка целиком сдвинулась вверх относительно плоскости, содержащей закрепленные узлы и наклонилась относительно вертикальной оси (рис. 4, б). В закрепленных узлах наблюдаются пиковые напряжения, превышающие 450 МПа и неправдоподобное искажение сетки отливки в области «бандажной полки».

Следующий численный эксперимент состоял в определении НДС отливки с учетом ее взаимодействия с формой, заданной как абсолютно жесткое тело. Поля перемещений, полученные в ProCAST и с использованием разработанной модели (рис. 5) показывают изменение геометрии отливки в стесненных

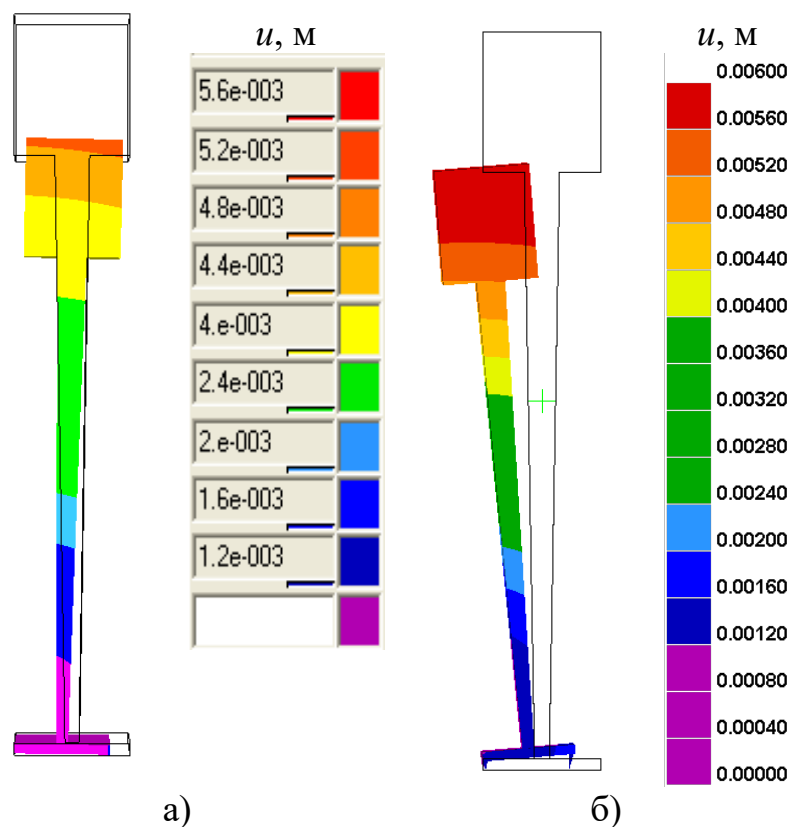


Рис. 4. Поле перемещений узлов сетки на последнем шаге расчета:

а) разработанная модель; б) ProCAST

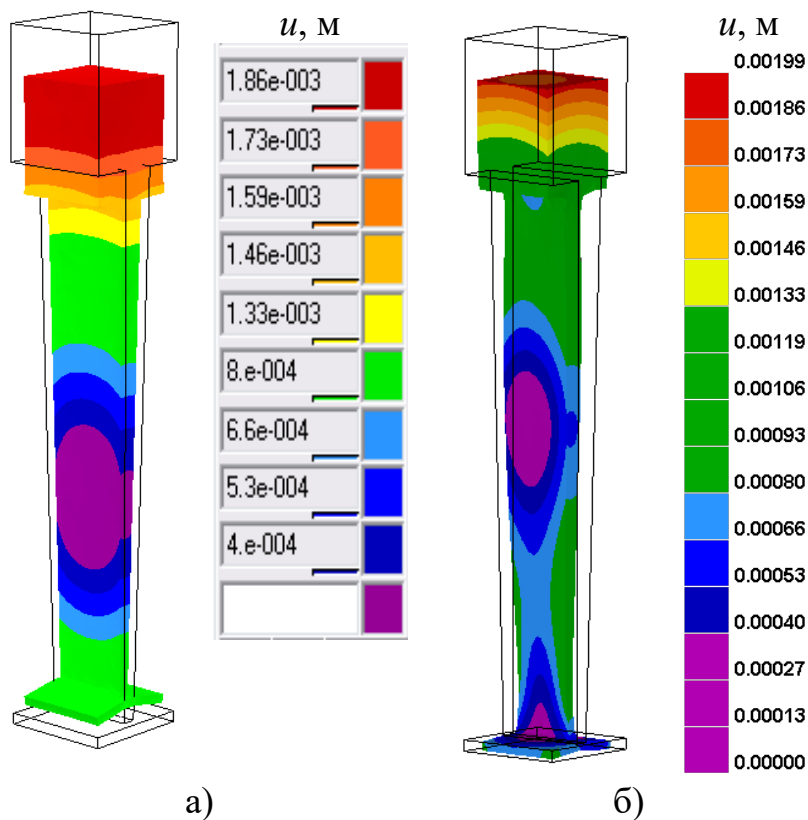


Рис. 5. Поле перемещений узлов сетки на последнем шаге расчета:

а) разработанная модель; б) ProCAST

условиях. Из-за того, что «перо» отливки закреплено с обоих концов в нем присутствует зона с перемещениями, близкими к нулевым.

Последний численный эксперимент проверяет качество критерия разрушения (10) путем моделирования остывания кольцевой пробы на горячеломкость и сравнения результата со справочными данными для сплава АЛ7. В расчете учитывается влияние стальных стержней и холодильников. Тип прогнозируемых трещин (горячие или холодные) определялся по предварительно сделанному температурному расчету. Первый «треснувший» узел появился на седьмой секунде кристаллизации, а на семнадцатой секунде процесс начал приобретать лавинообразный характер. Зафиксировано, что «трещины» появляются в областях отливки с содержанием 15-20% жидкой фазы (рис. 6). Это дает основание считать «трещины» горячими. Образование «трещин» произошло в кольцевой пробе с шириной кольца 35 мм, тогда как соседнее кольцо шириной 40 мм осталось целым, что хорошо согласуется со справочными данными.

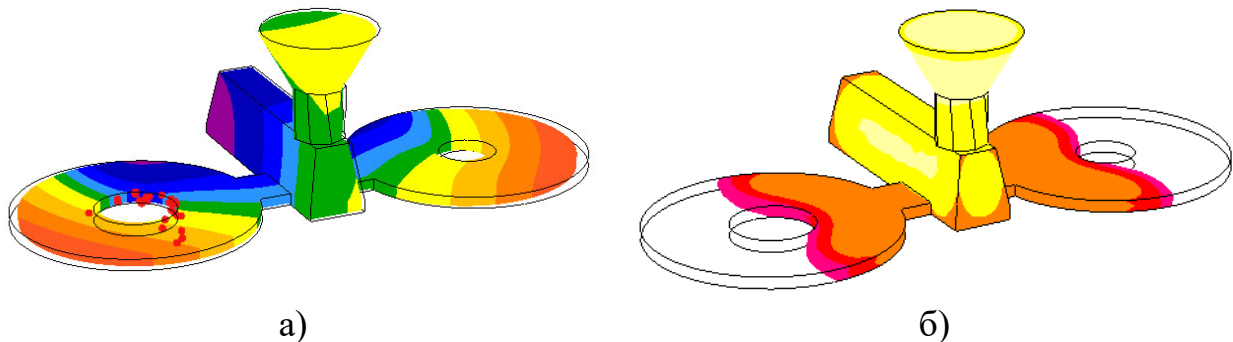


Рис. 6. «Треснувшие» узлы отливки (а) и поле доли жидкой фазы (б)

в момент времени $\tau = 17$ сек

Проведенные численные эксперименты показывают, что разработанная математическая модель НДС отливки отвечает современным требованиям к таким моделям. Показана устойчивая работа заложенных в модель алгоритмов и методов, в том числе, по сравнению с соответствующей моделью STRESS лидирующей европейской системы для моделирования литья ProCAST. Критерий, прогнозирующий возможное возникновение трещин, показал хорошее совпадение со справочными данными.

В четвертой главе дана общая характеристика СКМ ЛП «ПолигонСофт» с интегрированной в него методикой расчета НДС (модуль «Салют-D»). Описана

методика получения экспериментальных температурных зависимостей теплофизических и механических свойств жаропрочных сплавов на основе никеля ЧС70-ВИ и ЧС88-ВИ, широко применяемых для производства деталей турбин ГТД и ГТУ ответственного назначения методом ЛВМ. Для указанных сплавов на приборах фирмы NETZSCH экспериментально определены температуры солидус, ликвидус, удельная теплота плавления, температурные зависимости доли твердой фазы, удельной теплоемкости и температуропроводности. На электромеханической универсальной испытательной машине Walter + Bai AG LFM 50 определены механические свойства нетермообработанных литых образцов при различных температурах. Получены температурные зависимости модуля упругости, предела текучести, упрочнения и предела прочности.

Определенные свойства сплавов использованы для анализа причин возникновения трещин в отливке «Колесо рабочее ТНД» ГТД-1000. При освоении производства газотурбинного двигателя мощностью 1 МВт инженерами завода ФГУП «ММПП «Салют» была разработана технология получения отливки «Колесо рабочее ТНД» из сплава ЧС88-ВИ методом ЛВМ. В начале производства этой отливки наблюдался устойчивый дефект – трещины лопаток в области перехода к бандажному кольцу (рис. 7). Для принятия решения об изменении технологии, провели ее моделирование с расчетом НДС в модуле «Салют-D». Расчет НДС и анализ результатов подтвердил образование холодных трещин (рис. 7). Исследование температурного поля выявило высокие скорости охлаждения – свыше 200 градусов в минуту, в районе выходных кромок лопаток, т.е. там, где возникали трещины. Это позволило предположить, что критические температурные напряжения, приводящие к разрушению, вызваны слишком интенсивным охлаждением. Было принято решение о разработке новой технологии производства отливки, включая смену ЛПС и плавильной установки. Предварительное моделирование новой технологии, включая НДС отливки, показало снижение уровня напряжений в критических зонах отливки более чем в четыре раза (рис. 8) и отсутствие в ней трещин. Заливка опытной партии доказала правильность выбранного решения. Новая технология внедрена в серийное производство.

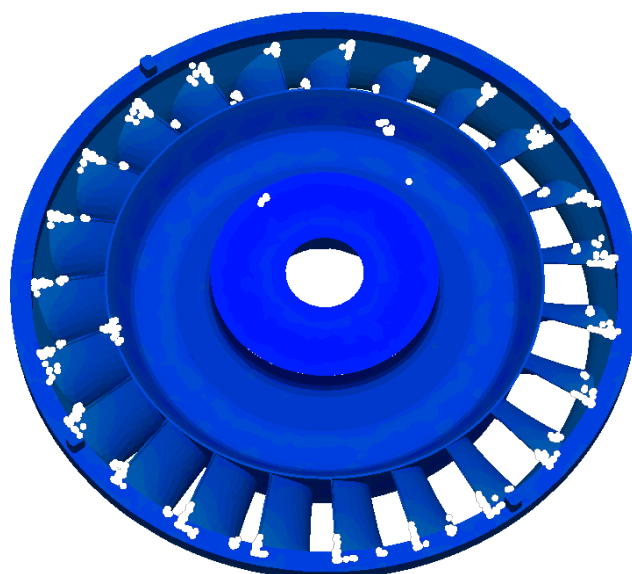
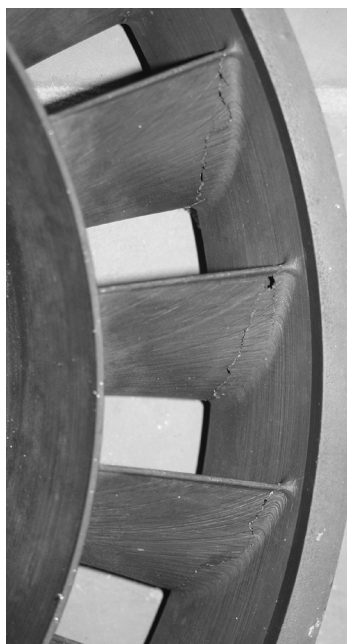


Рис. 7. Результаты расчета НДС отливки «Колесо рабочее ТНД»

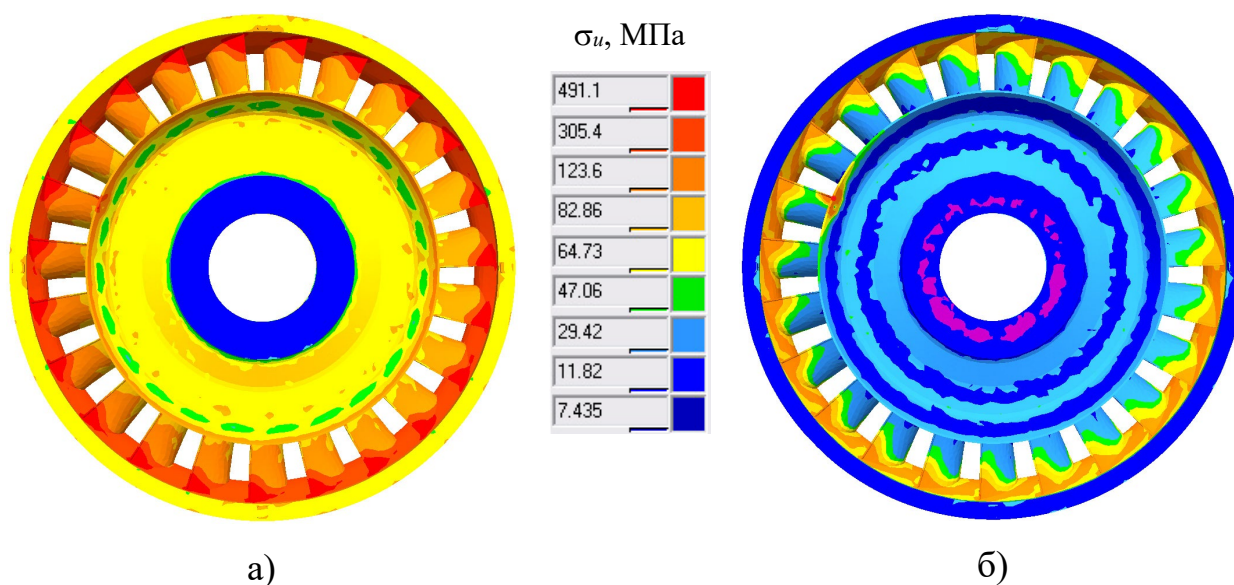


Рис. 8. Поле напряжений в отливке на 800 сек остывания:

а) старая технология; б) новая технология

Полученные свойства сплава ЧС70-ВИ были использованы при доработке технологии изготовления отливки «Лопатка рабочая 3-ей ступени» для наземной газотурбинной установки ГТЭ-20С. При конструировании литейного блока (рис. 9, а) были допущены ошибки, которые привели к появлению стабильного брака: усадочной микропористости в пере вдоль оси z лопатки в районе $C_{\max}$ и в радиусе перехода от пера к замку. Регулярно выявлялась макропористость на торце хвостовика при отделении прибыльной части. В результате

проработки нескольких вариантов технологии с учетом ограничений оборудования, была предложена новая конструкция литейного блока с дополнительным питанием пера лопатки через стояк с четырьмя питателями (рис. 9, б). При этом возникло опасение, что массивный стояк $\varnothing 38$ мм, прикрепленный четырьмя питателями к относительно тонкому перу, может при остывании деформировать лопатку. Проверка этого предположения была проведена с помощью модуля «Салют-D». Расчет НДС показал, что отливка почти полностью деформируется в упругой области, т.е. происходит изменение ее размеров без изменения формы (рис. 9, в). Зафиксированные пластические деформации имеют малую величину (порядка 10^{-4}), поэтому их можно не принимать во внимание. Отсутствие перехода в пластическое состояние достигается относительно низкими скоростями охлаждения, благодаря утеплению формы четырьмя слоями изоляции FIBERFAX. Результаты обмера на измерительном комплексе ATOS опытной партии лопаток подтвердили незначительность отклонений отливок от базовой модели.

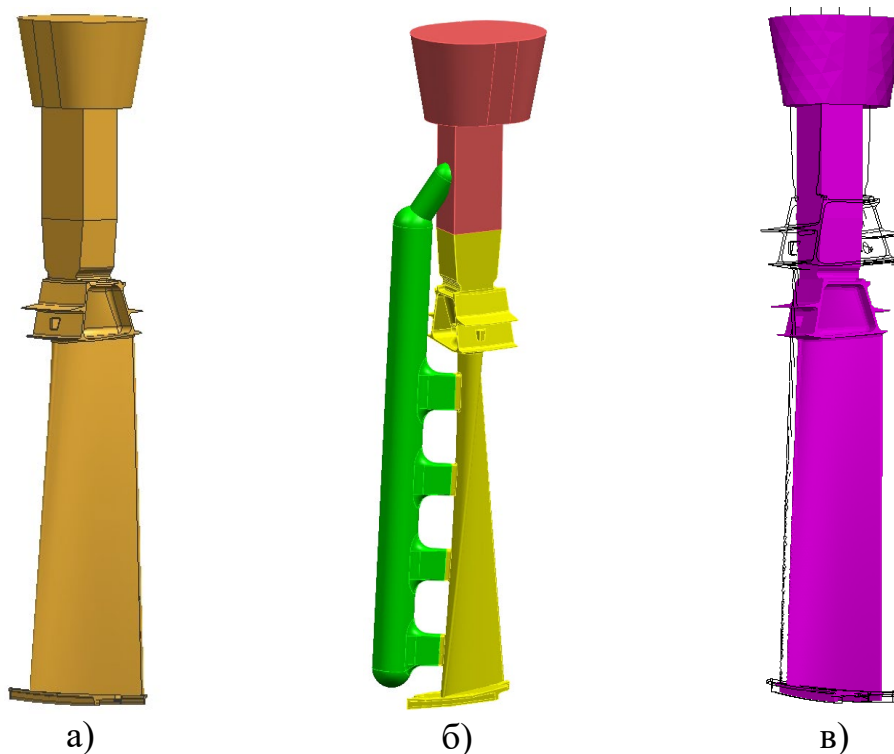


Рис. 9. Рабочая лопатка третьей ступени:

- а) старая конструкция литейного блока; б) новая конструкция литейного блока;
в) коробление отливки

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Проведен теоретический анализ методов моделирования НДС в процессе затвердевания и охлаждения фасонных отливок в формах при их гравитационной заливке. Доказано, что для создания корректной модели этого процесса, необходимо наряду с учетом неравномерности температурных полей отливки и формы учитывать жесткость литейной формы.

2. Разработана математическая модель для расчета термических напряжений в фасонных отливках и литейных формах, включающая в себя термоупругопластичную модель поведения материалов. Разработанная ММ применима для гравитационных методов литья и учитывает точную геометрию тел отливки и всех элементов формы, механический контакт между отливкой и формой, а так же между разными элементами формы. ММ позволяет использовать для каждого тела соответствующие ему механические свойства и модель поведения (вакантная, абсолютно жесткая, упругая, упругопластическая).

3. На основе теории наибольшей удельной потенциальной энергии формоизменения сформулирован критерий трещинообразования, позволяющий прогнозировать возможность разрушения материала отливки при изменении ее НДС.

4. На основе решения системы дифференциальных уравнений равновесия и критерия трещинообразования разработана методика автоматизированного расчета для прогнозирования горячих и холодных трещин в фасонных отливках и их коробления. По результатам экспериментального моделирования НДС и образования горячих трещин подтверждена адекватность разработанной ММ. Для выполнения этих расчетов создан программный модуль MECHMLD.exe.

6. Расчетная методика и ее программная реализация внедрена в СКМ ЛП «ПолигонСофт» в качестве дополнительного решателя НДС, названного «Салют-D».

7. Получены теплофизические и механические свойства жаропрочных сплавов на основе никеля ЧС70-ВИ и ЧС88-ВИ в широком диапазоне темпера-

тур, что позволяет производить анализ технологических процессов литья с применением СКМ ЛП.

8. С использованием модуля «Салют-D» в составе СКМ ЛП «Полигон-Софт» на ФГУП «ММПП «Салют» проведена разработка технологий изготовления отливок «Колесо рабочее ТНД» ГТД-1000 из сплава ЧС88-ВИ и «Лопатка рабочая 3-ей ступени» ГТУ МЭС-60 из сплава ЧС70-ВИ. С учетом моделирования НДС, в первом случае получены конструкция блока и технологический режим, позволившие устранить возникновение холодных трещин в отливке, а во втором - подтвердилась возможность без последствий коробления отливки использовать подвод металла непосредственно в перо лопатки через питатели от стояка. Обе разработанные технологии внедрены в серийное производство на ФГУП «ММПП «Салют».

Основные результаты работы представлены в следующих публикациях:

1. Александрович А.И., Монастырский А.В., Соловьев М.Б. Моделирование термоупругопластического прочностного состояния трехмерных изделий // Сообщения по прикладной математике. Вычислительный центр им. А.А. Дородницына. -М.: РАН. – 2006. 30 с.
2. Монастырский А.В., Александрович А.И. Разработка программного модуля для моделирования напряженно-деформированного состояния отливки при кристаллизации в системе САМ ЛП «Полигон» // Материалы всероссийской н.т.к. «Новые материалы и технологии».-М.: «МАТИ», -2006, Т.1, - С. 38- 39.
3. Монастырский В.П., Александрович А.И., Монастырский А.В., Соловьев М.Б., Тихомиров М.Д. Моделирование напряженно-деформированного состояния отливки при кристаллизации // Литейное производство. - 2007. - № 9. - С. 29-34.
4. Монастырский А.В., Александрович А.И., Соловьев М.Б. Расчет напряжений и деформаций в литых заготовках при кристаллизации // Материалы XV международной конференции по вычислительной механике и современным при-

кладным программным системам (ВМСППС'2007) 25-31 мая 2007 - Алушта. М.: Вузовская книга. - 2007. – С. 388-389.

5. Смыков А.Ф., Монастырский А.В. Компьютерное моделирование деформаций в отливках при кристаллизации и охлаждении // Труды шестой Всероссийской н.п.к. «Применение ИПИ – технологий в производстве». М.: «МАТИ», - 2008, - С. 39-41.

6. Монастырский А.В., Смыков А.Ф., Панкратов В.А., Соловьев М.Б. Прогноз образования горячих трещин и расчет коробления отливок в СКМ ЛП «ПолигонСофт» // Литейное производство. -2009, -№ 5, - С. 46-49.

7. Монастырский А.В., Смыков А.Ф., Соловьев М.Б. Моделирование деформаций и трещин в фасонных отливках // Труды седьмой Всероссийской н.п.к. «Применение ИПИ – технологий в производстве». М.: «МАТИ», -2009, - С. 31-34.

8. Монастырский А.В., Смыков А.Ф. Моделирование напряженно-деформированного состояния отливок при их формировании в СКМ «ПОЛИГОНСОФТ»//Сборник трудов 8-ой Всероссийской с международным участием н.т.к. «Быстозакаленные материалы и покрытия».-М.: «МАТИ», 2009, - С. 347-351.

9. Монастырский А.В., Смыков А.Ф.Особенности моделирования возникновения трещин в отливках на примере СКМ ЛП «ПолигонСофт» // Литейное производство. -2010, -№ 12, - С. 12-14.

10. Монастырский А.В., Смыков А.Ф. Программный модуль для расчета напряженно-деформированного состояния отливки и формы в составе СКМ «Полигон Софт»//Труды восьмой Всероссийской н.п.к. «Применение ИПИ – технологий в производстве». М.: «МАТИ», -2010, - С. 25 - 27.

11. Монастырский А.В., Смыков А.Ф. Моделирование напряженно-деформированного состояния при оптимизации технологии изготовления отливки «колесо рабочее ТНД» из жаропрочного никелевого сплава //Материалы н.т.к. «Новые материалы и технологии».М.: «МАТИ», -2010, Т.1, - С. 33-34.