

На правах рукописи

СЕВАСТЬЯНОВ Георгий Мамиевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ
НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ПРИ ЗАЛИВКЕ И ЗАТВЕРДЕВАНИИ МЕТАЛЛА В
КЕРАМИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКОВОЙ ФОРМЕ

01.02.04 - механика деформируемого твёрдого тела

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук



Владивосток - 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения РАН.

- Научный руководитель: Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Одинокое Валерий Иванович
- Научный консультант: доктор технических наук, доцент
Сапченко Игорь Георгиевич
- Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Чехонин Константин Александрович;
кандидат физико-математических наук,
доцент Любимова Ольга Николаевна
- Ведущая организация: Институт проблем машиноведения РАН,
г. Санкт-Петербург

Защита состоится «25» ноября 2011 года в 12 часов на заседании диссертационного совета ДМ005.007.02 при Институте автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5, аудитория 510, e-mail: dm00500702@iasp.dvo.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН.

Автореферат разослан «___» октября 2011 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук



Дудко О. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В литейном производстве известен метод литья в керамические оболочковые формы. Данный метод используется для высокоточной отливки геометрически сложных деталей в различных отраслях промышленности. Одним из недостатков этого способа является высокий процент брака, связанный с частичным или полным разрушением формы при заливке ее расплавом металла, а также на начальной стадии затвердевания отливки.

Образование трещин в керамике формы связано с наличием нестационарного температурного воздействия при заливке и возникающего в результате неравномерного нагрева термоупругого напряженного состояния.

Основой для развития теории термоупругости, ее фундаментальных соотношений послужили работы Т. А. Афанасьевой-Эренфест, М. А. Био, Г. Джеффриса, Дюамеля, Каратеодори, В. Фойгта, Н. Н. Шиллера.

Вопросам и задачам теории термоупругости посвящены исследования отечественных и зарубежных ученых В. И. Даниловской, Ю. Игначака, А. Д. Коваленко, В. Д. Купрадзе, В. М. Майзея, Н. И. Мухелишвили, В. Новацкого, П. Ф. Папковича и других.

Были получены решения многих модельных задач теории упругости, однако для целей практического расчета такие решения имеют ограниченное применение. Для реальных задач, характеризующихся геометрически сложной расчетной областью, несомненные преимущества имеют численные методы для получения приближенных решений.

Со второй половины XX века получили широкое развитие численные методы решения задач термоупругости, основанные на разностном представлении исходной системы дифференциальных уравнений в частных производных (метод конечных разностей), на дискретизации расчетной области и отыскании решения в виде некоторой аппроксимирующей функции на каждой из подобластей (метод конечных элементов) и на представлении решения в виде некоторого функционального ряда (метод Рунца, метод Галеркина и другие).

Корректная постановка задачи определения напряженно-деформированного состояния в керамических формах в рамках теории термоупругости подразумевает некоторые особенности:

- 1) входящее в определяющую систему дифференциальное уравнение теплопроводности должно отражать наличие фазового перехода при затвердевании металла, что осложняет его решение;
- 2) контактные условия теплообмена должны учитывать разнородность компонентов системы (жидкий металл, затвердевшая часть отливки, керамическая форма);

3) часть слоев формы может отличаться от остальных по теплофизическим и физико-механическим параметрам (в случае слоев из пористой керамики), в последнем случае необходимо наличие аналитических зависимостей эффективных параметров гетерогенной среды от ее степени пористости.

Исходя из этого, определение напряженно-деформированного состояния материала керамической литейной формы с помощью численных методов теории термоупругости является отдельной актуальной задачей.

Целью работы является разработка численных схем, алгоритмов и программ для определения напряженно-деформированного состояния керамической оболочковой формы, вызванного нестационарным температурным воздействием расплава стали при его заливке и затвердевании с учетом выделяющейся теплоты фазового перехода; исследование влияния высокопористых слоев керамики на напряженное состояние материала; выбор расположения и параметров пористых слоев в форме, обеспечивающих повышение стойкости формы к термическому воздействию.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- исследованы температурные поля и поля тензоров напряжений при заливке и затвердевании расплава стали в керамической форме;
- проведен анализ влияния степени пористости и расположения высокопористых слоев керамики на напряженное состояние оболочки;
- выявлены структуры форм, обеспечивающие существенное снижение термических напряжений в рассматриваемых процессах.

Достоверность полученных результатов основана на использовании фундаментальных уравнений механики сплошных сред, апробированных разностных схем и численных методов.

Практическая значимость работы. Численное решение поставленных задач и полученные оценки напряженно-деформированного состояния могут быть использованы при промышленном внедрении новых технологий изготовления керамических оболочковых форм с целью повышения качества металлоизделий, снижения брака и конечной себестоимости отливки. Математическая модель процесса, численный алгоритм и программы расчета могут быть использованы при проектировании опытных структур керамических форм для виртуального моделирования протекающих в них тепловых и деформационных процессов. Использованные подходы, методы расчета и программы могут быть полезны при исследовании схожих процессов в металлургии.

Апробация работы. Результаты работы докладывались автором на следующих конференциях:

- Всероссийская конференция «Успехи механики сплошных сред», приуроченная к 70-летию академика В. А. Левина, г. Владивосток, 2009;
- XXXV Дальневосточная математическая школа-семинар им. ак. Е. В. Золотова, г. Владивосток, 2010;
- Всероссийская конференция «Школа по фундаментальным основам моделирования обработки материалов», г. Комсомольск-на-Амуре, 2010;
- XXIX Российская школа по проблемам науки и технологий, г. Миасс, 2009;
- IV Российская научно-техническая конференция «Ресурс и диагностика материалов и конструкций», г. Екатеринбург, 2009;
- Третья международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» DFMN-09, г. Москва, 2009;
- Вторая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России 2009», г. Москва, 2009;
- VIII Международная научно-практическая конференция «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности», г. Санкт-Петербург, 2009;
- Международная конференция «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики», г. Воронеж, 2009;
- Международная научно-техническая конференция «Теория и практика механической и электрофизической обработки материалов», г. Комсомольск-на-Амуре, 2009;
- XVIII Всероссийская школа-конференция «Математическое моделирование в естественных науках 2009», г. Пермь, 2009;
- VIII Международная научно-техническая конференция «Материалы и технологии XXI века», г. Пенза, 2010.

Публикации по работе. По теме диссертации опубликовано 18 научных работ, в том числе 4 статьи в ведущих рецензируемых журналах из списка ВАК и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы (94 наименования). Объем работы – 101 страница с 37 рисунками.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении проанализированы вопросы исследования напряженно-деформированного состояния материалов с позиций термоупругости, сформулирована цель, научная новизна и практическая значимость работы, обоснована достоверность полученных результатов. Приведены публикации автора по теме диссертации, список конференций, на которых докладывалась работа. Кратко представлено содержание диссертации по главам.

В первой главе обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертации. В первом параграфе исследуются задачи повышения стойкости литейных форм. Проводится обзор методов упрочнения керамических оболочек, исследуются их основные достоинства и недостатки. Описывается принцип опытной технологии изготовления керамических форм с использованием высокопористых промежуточных слоев.

Во втором параграфе приводится инженерная постановка задачи – геометрическое и техническое описание формы и исследуемых процессов.

Вторая глава посвящена построению математической модели процесса заливки и затвердевания металла в керамической оболочковой форме.

В первом параграфе сформулирована математическая постановка задачи в определяющих соотношениях термоупругости. Определяющая система дифференциальных уравнений в частных производных включает:

1) нестационарное уравнение теплопроводности с внутренними источниками тепла

$$\nabla^2 \theta - \frac{1}{a} \cdot \dot{\theta} + \frac{\rho \cdot q_m}{\lambda} = 0, \quad (1)$$

где $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2}$ – оператор Лапласа, θ – температура, $\dot{\theta} = \frac{\partial \theta}{\partial \tau}$, τ – время, $a = \frac{\lambda}{C \cdot \rho}$ – коэффициент температуропроводности, λ – коэффициент теплопроводности, C – удельная массовая теплоёмкость, ρ – плотность; величина q_m в уравнении (1) представляет собой количество теплоты, выделяющееся в единицу времени в объёме вещества, единичном по массе (отличное от нуля только в двухфазной области металла);

2) физические уравнения – закон Дюамеля-Неймана

$$\sigma_{ij} = 2 \cdot G \cdot \left[\varepsilon_{ij} + \frac{\nu \cdot \varepsilon - (1 + \nu) \cdot \alpha \cdot \Delta \theta}{1 - 2 \cdot \nu} \cdot \delta_{ij} \right], \quad (2)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, ε_{ij} и $\varepsilon = \varepsilon_{ii}$ – компоненты и первый инвариант тензора деформаций соответственно, δ_{ij} – символ Кронекера, G – модуль сдвига, ν – коэффициент Пуассона, α – коэффициент линейного термического расширения, $\Delta \theta$ – абсолютное изменение температуры относительно исходной (в недеформированном состоянии);

3) линейные геометрические соотношения Коши, устанавливающие связь между компонентами тензора деформаций и компонентами перемещений в случае малых деформаций

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \cdot (u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (3)$$

где $u_{i,j} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$, u_i – проекции перемещений на i -ую координатную ось;

4) статические уравнения равновесия без учета массовых и инерционных сил

$$\sigma_{ij,j} = 0, \quad (4)$$

здесь суммирование проводится по повторяющемуся индексу.

Во втором параграфе приведены начальные и граничные условия задачи (рис. 1), а также соотношения осевой симметрии.

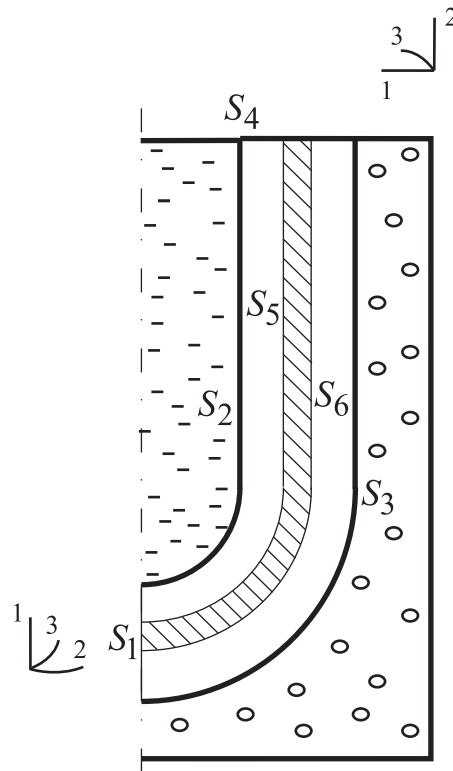


Рис. 1. К граничным условиям задачи

1) Начальные условия:

- в недеформированном состоянии напряжения и перемещения на всей расчетной области равны нулю;
- начальная температура прогрева формы равна θ_f^0 ;
- температура заливки металла равна θ_m^0 .

На этапе заливки температура металла принимается постоянной в силу перемешивания, и температурная задача решается только для керамической формы.

2) Соотношения осевой симметрии:

$$q_3 = 0, \quad u_3 = 0, \quad \sigma_{13} = \sigma_{31} = \sigma_{23} = \sigma_{32} = 0.$$

3) Граничные условия тепловой задачи:

$$q\Big|_{S_1} = 0, \quad q\Big|_{S_3} = \alpha_{ht} \cdot (\theta_{S_4} - \theta_{env}),$$

где α_{ht} – коэффициент теплоотдачи, θ_{S_3} – температура формы на поверхности S_3 , θ_{env} – температура окружающей среды; $q\Big|_{S_4} = 0$; плотности тепловых потоков через поверхности S_2, S_5, S_6 раздела сред, существенно различающихся по коэффициенту теплопроводности (металл, плотная керамика, пористая керамика), задаются согласно контактными условиям третьего рода типа Фурье.

4) Граничные условия деформационной задачи:

$$\begin{aligned} u_1\Big|_{S_3} = 0, \quad u_2\Big|_{S_1} = 0, \quad \sigma_{11}\Big|_{S_2} = P, \quad \sigma_{22}\Big|_{S_4} = 0, \\ \sigma_{12}\Big|_{S_2} = 0, \quad \sigma_{12}\Big|_{S_3} = 0, \quad \sigma_{21}\Big|_{S_1} = 0, \quad \sigma_{21}\Big|_{S_4} = 0. \end{aligned}$$

Третья глава посвящена численным методам решения сформулированных тепловой и деформационной задач. В первом параграфе представлен обзор методов решения уравнения теплопроводности. Отмечаются достоинства и недостатки различных подходов. Обосновывается выбор схемы для получения конечно-разностного аналога исходного дифференциального уравнения. Кратко описан принцип сведения уравнения теплопроводности с внутренними источниками теплоты фазового и структурного переходов к уравнению, не содержащему источники в явном виде.

Во втором параграфе строится разностная схема решения уравнения теплопроводности в гетерогенных средах при наличии фазового перехода. Учет внутренних источников тепла проводится на основе методов сквозного счёта. При этом наблюдаемый разрыв в скорости охлаждения расплава, вызванный наличием площадки двухфазности, учитывается введением характеристики эффективной теплоемкости, имеющей разрыв первого рода на границах ликвидуса и солидуса. Аналитическая запись этой характеристики основана на построении спектральной функции тепловыделения по модифицированной фазовой диаграмме Fe-C. Для сведения дифференциального уравнения теплопроводности к системе алгебраических уравнений используется разностная схема Кранка-Николсон. Расчет температурных полей в областях сложной конфигурации, описываемых произвольными системами ортогональных координат, проводится по итеративному методу, предложенному В. И. Одиновым. Схема итерационного процесса определения температурных полей

имеет вид:

$$\theta_{i,j}^{(\tau)} = \frac{D + t11 \cdot \theta_{i,j-1}^{(\tau)} + t12 \cdot \theta_{i,j+1}^{(\tau)} + t21 \cdot \theta_{i-1,j}^{(\tau)} + t22 \cdot \theta_{i+1,j}^{(\tau)}}{A_{i,j} + t11 + t12 + t21 + t22}, \quad (5)$$

$$D = A_{i,j} \cdot \theta_{i,j}^{(\tau-\Delta\tau)} + \sum_{k=1}^2 \left(q_k^{1(\tau-\Delta\tau)} \cdot F_k^1 - q_k^{2(\tau-\Delta\tau)} \cdot F_k^2 \right),$$

$$A_{i,j} = \frac{2 \cdot \tilde{C}_{i,j} \cdot \rho_{i,j} \cdot V_{i,j}}{\Delta\tau}, \quad \tilde{C} = C - L \cdot \frac{d\psi}{d\theta},$$

где $q_k^{1(\tau-\Delta\tau)}$, $q_k^{2(\tau-\Delta\tau)}$ – мгновенные значения плотностей тепловых потоков в начале временного шага через площади F_k^1 , F_k^2 по k -ой координате, соответственно в направлении, противоположном k -ой координатной оси, и в направлении, совпадающем с k -ой координатной осью; \tilde{C} – эффективная теплоёмкость; L – скрытая теплота кристаллизации; $\psi = \psi(\theta)$ – функция, определяющая долю твердой фазы в расплаве при температуре θ ; V – объем элемента; $\Delta\tau$ – шаг по времени.

Формула (5) представляет собой реализацию метода Гаусса-Зейделя решения системы линейных алгебраических уравнений.

Неотрицательные множители $t11$, $t12$, $t21$, $t22$ для элемента задаются в зависимости от условий теплообмена между ним и соседними элементами по соотношениям, представленным в диссертации. Обозначение типа « $A_{i,j}$ » означает принадлежность величины элементу (i, j) . В итерационной процедуре (5) используются теплофизические характеристики материала – теплоёмкость C и теплопроводность λ . В конце второго параграфа приводятся зависимости этих характеристик от степени пористости слоев $\eta = 1 - \frac{\rho\eta}{\rho_0}$.

В третьем параграфе проводится обзор методов решения системы деформационных соотношений теории термоупругости. Проводится краткое сравнение численных методов конечных разностей и конечных элементов. Обосновывается выбор численного метода, предложенного В. И. Одиноквым.

В четвертом параграфе описано построение разностной схемы решения системы уравнений термоупругости в перемещениях для тел с осевой симметрией. Используется конечно-разностное представление уравнений в частных производных для расчетной области, разбитой на элементы системой криволинейных ортогональных поверхностей. Алгоритм расчета заключается в преобразовании системы конечно-разностных уравнений к системе линейных алгебраических уравнений с меньшим числом базисных неизвестных.

1) Из геометрических соотношений Коши (3) компоненты деформаций для каждого элемента расчетной области выражаются через перемещения на его гранях.

2) Суммирование уравнения Дюамеля-Неймана (2) по главным компонентам тензора напряжений приводит к соотношению:

$$\varepsilon = 3 \cdot k \cdot \sigma + 3 \cdot \alpha \cdot \Delta\theta, \quad (6)$$

где $k = \frac{1 - 2 \cdot \nu}{2 \cdot G \cdot (1 + \nu)}$ – коэффициент объемного сжатия материала, ν – коэффициент Пуассона, σ – первый инвариант тензора напряжений. Из уравнения (6) с учетом выраженных в пункте 1 деформаций одна группа перемещений u_2 может быть выражена через другую $\{u_1, \sigma\}$.

3) Из (2) очевидно следуют выражения для касательных напряжений:

$$\sigma_{ij} = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_{ij}, \quad i \neq j. \quad (7)$$

Таким образом, с учетом граничных условий все касательные напряжения могут быть выражены через базисные неизвестные $\{u_1, \sigma\}$.

4) В уравнениях равновесия (4) выразим разности главных компонентов тензора напряжений через уравнения

$$\begin{aligned} \sigma_{11} - \sigma_{22} &= 2 \cdot G \cdot (\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}), \\ \sigma_{11} - \sigma_{33} &= 2 \cdot G \cdot (\varepsilon_{11} - \varepsilon_{33}), \end{aligned} \quad (8)$$

очевидно следующие из уравнения (4). Получим соотношения, позволяющие итеративно выразить компоненты напряжений σ_{11} и σ_{22} из граничных условий через базисные неизвестные $\{u_1, \sigma\}$.

5) Из второго уравнения (8) выразим через базисные неизвестные напряжения σ_{33} .

6) Первое уравнение (8) и уравнение $\sigma = (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})/3$, представляющее определение первого инварианта тензора напряжений, составленные для каждого элемента области, представляют собой систему из $2N$ линейных алгебраических уравнений с $2N$ базисными неизвестными $\{u_1, \sigma\}$, где N – число элементов расчетной области.

7) Решив систему, полученную в предыдущем пункте, определим значения базисных неизвестных, а, следовательно, из пунктов 1-5 – значения всех неизвестных деформаций, напряжений и перемещений.

Для вычисления коэффициентов системы используется известная численная процедура с изменениями, снижающими время расчета, изложенная в конце четвертого параграфа диссертации. В алгоритме 1-7 используются физико-механические характеристики материала – модуль сдвига G , коэффициент объемного сжатия k и коэффициент линейного термического расширения α . В конце третьей главы приводятся зависимости этих характеристик от степени пористости слоев.

Четвертая глава посвящена решению задач определения полей тензоров напряжений, вызванных нестационарными температурными полями, при заливке и затвердевании металла в керамических формах с различными типами структур.

Анализ напряженного состояния форм показал:

- 1) нормальные напряжения σ_{22} и σ_{33} численно практически совпадают; значения нормальных напряжений σ_{11} и касательных напряжений меньше значений напряжений σ_{22} приблизительно на порядок;
- 2) максимальные растягивающие нормальные напряжения σ_{22} , возникающие после заливки вблизи внешней поверхности формы, для традиционной плотной формы близки к пределам прочности керамики; этим можно объяснить нередкие случаи частичного разрушения форм; напряжения сжатия, возникающие в первые моменты заливки во внутренних слоях формы, для некоторых температур прогрева также превосходят предел прочности керамики;
- 3) структуры форм со вторым (от контактной поверхности «металл-форма») пористым слоем испытывают существенно меньшие растягивающие напряжения σ_{22} ; величина этого эффекта зависит от степени пористости слоя.

На рис. 2-5 показаны эпюры напряжений σ_{22} для некоторых структур форм. Рисунки слева соответствуют напряженному состоянию формы на момент окончания заливки, справа – максимальным значениям σ_{22} (10-20 секунд после окончания заливки, в зависимости от типа структуры).

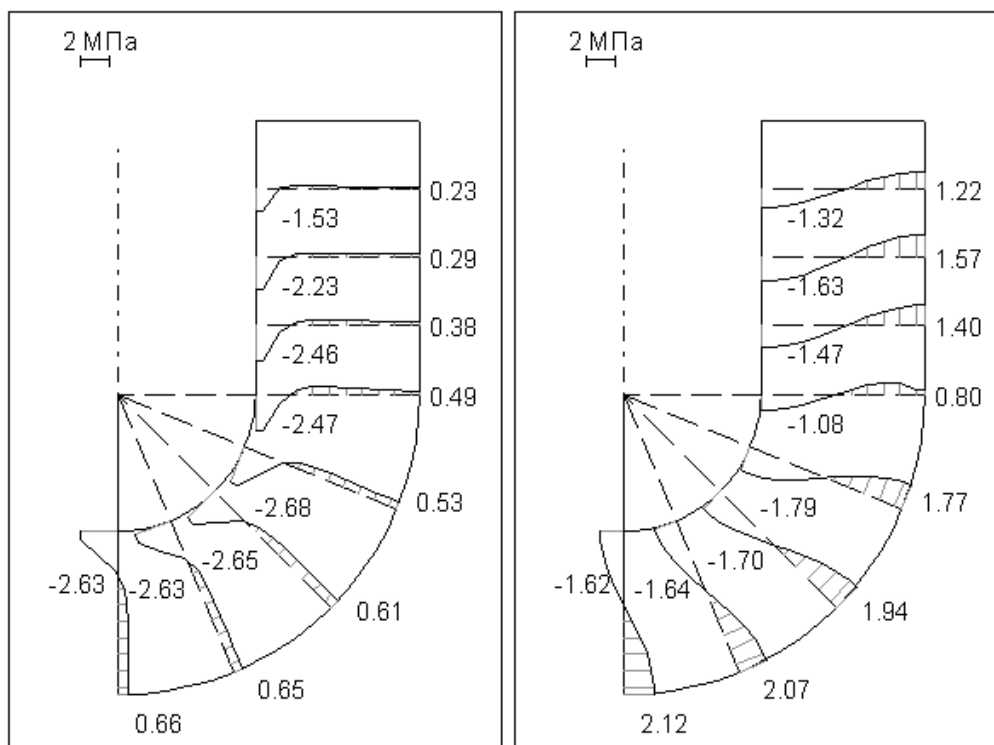


Рис. 2. Традиционная плотная форма

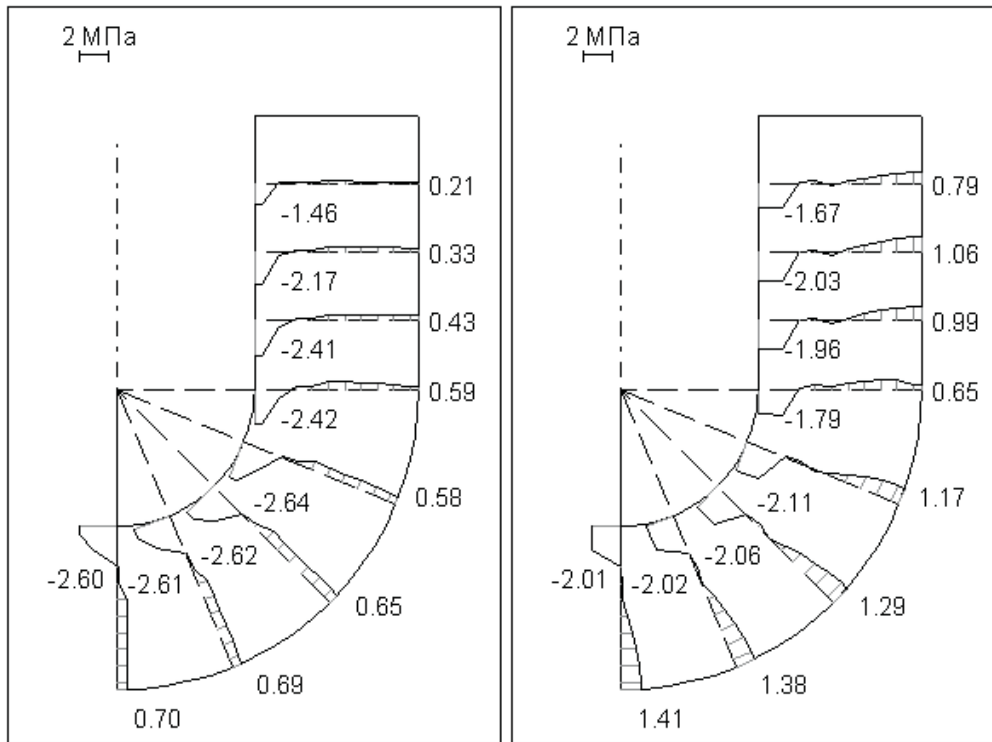


Рис. 3. Пористый слой 2, степень пористости 70%

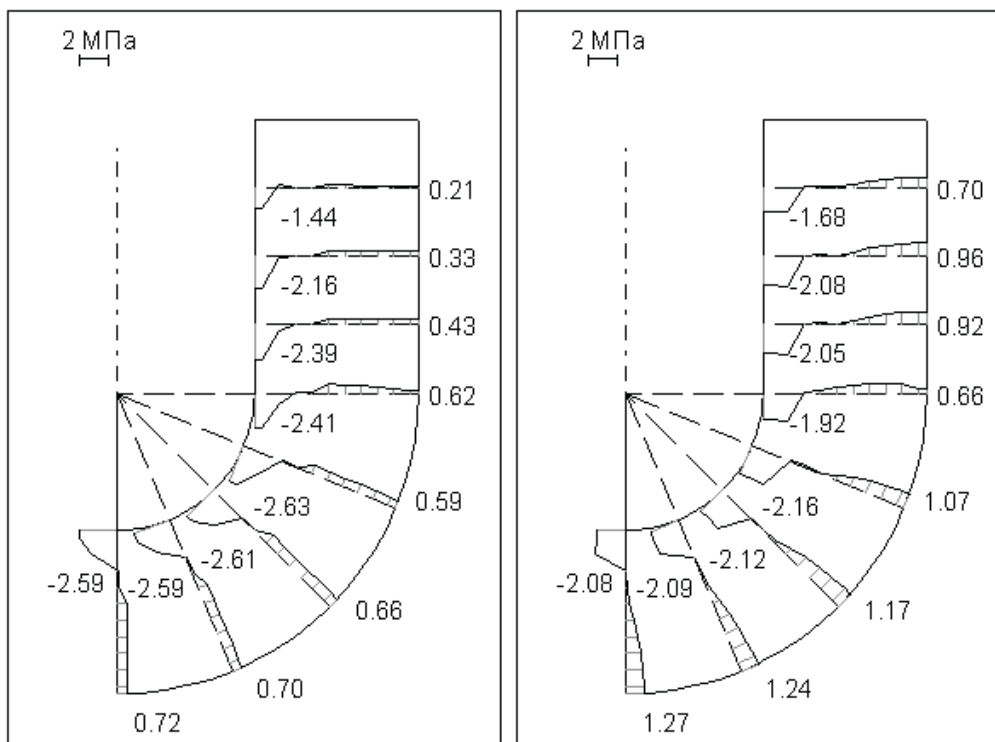


Рис. 4. Пористый слой 2, степень пористости 80%

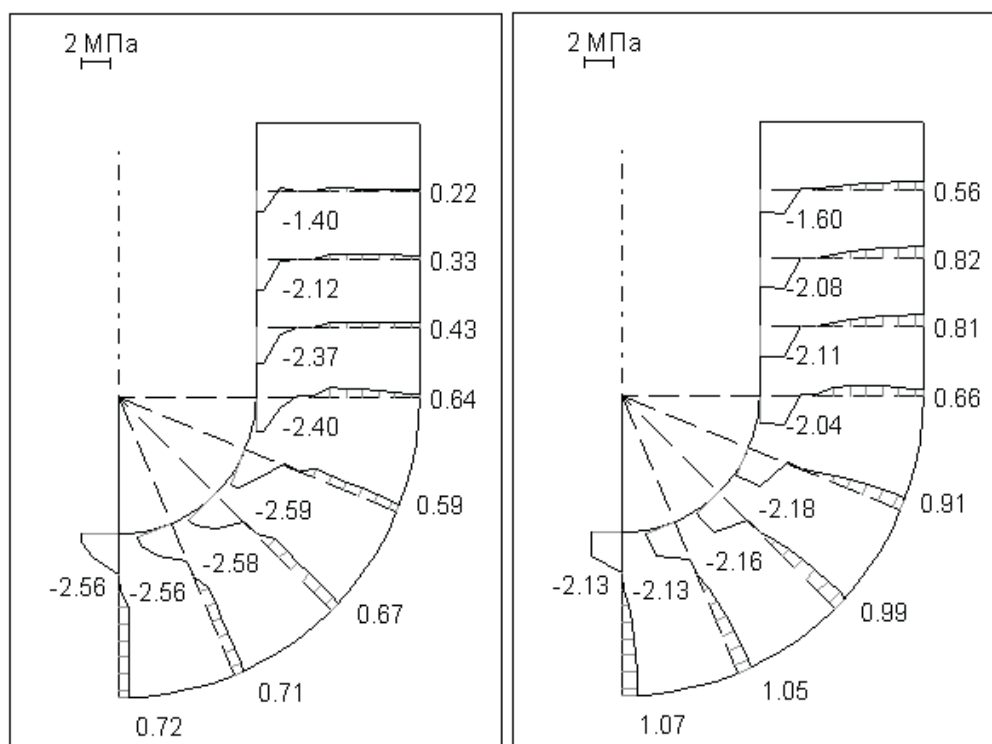


Рис. 5. Пористый слой 2, степень пористости 90%

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработан алгоритм и программа для расчета температурных полей и движущихся границ раздела фаз в задаче о заливке и затвердевании металла в осесимметричной керамической форме при наличии высокопористых промежуточных слоев.
2. Разработан алгоритм и программа для расчета полей тензоров напряжений в материале многослойной керамической формы, возникающих под действием нестационарного температурного воздействия.
3. Получены температурные поля с учетом выделяющейся теплоты фазового перехода и соответствующие им поля тензоров напряжений при различных вариантах изготовления керамических форм (по традиционной технологии с использованием плотной керамики, по опытной технологии с использованием слоев высокопористой керамики).
4. Проведен анализ влияния параметров пористости и расположения пористых слоев на напряженное состояние формы; определена структура пористой формы, обеспечивающая максимальное снижение термических напряжений.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Одинокое В. И., Севастьянов Г. М., Сапченко И. Г. Эволюция напряженного состояния керамической формы при нестационарном внешнем тепловом воздействии // Математическое моделирование. 2010. Т. 22, №11. С. 97-108.
2. Севастьянов Г. М., Одинокое В. И., Сапченко И. Г. Трещинообразование в керамических формах при заливке металла // Деформация и разрушение материалов. 2010. №10. С. 25-28.
3. Севастьянов Г. М., Одинокое В. И., Сапченко И. Г. Оптимизация структуры пористых огнеупорных керамических форм // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2010. №4(27). С. 101-108.
4. Севастьянов Г. М. Об одном способе расчета границы фронта кристаллизации в расплаве стали // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Серия «Науки о природе и технике». 2011. №II-1(6). С. 76-80.
5. Севастьянов Г. М., Одинокое В. И., Сапченко И. Г. Об одном алгоритме решения уравнения теплопроводности для керамической оболочковой формы в литье по выплавляемым моделям // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. 2010. №2(81). С. 243-249.
6. Одинокое В. И., Сапченко И. Г., Севастьянов Г. М. Моделирование процесса заливки металла в керамическую осесимметричную оболочковую форму // Прикладные задачи механики деформируемого твердого тела и прогрессивные технологии в машиностроении: сборник статей. Комсомольск-на-Амуре: ИМиМ ДВО РАН, 2009. Вып. 3, ч. 2. С. 18-38.
7. Севастьянов Г. М. Напряженно-деформированное состояние оболочковых форм в литье по выплавляемым моделям при заполнении расплавом стали // Ресурс и диагностика материалов и конструкций: материалы IV Российской научно-технической конференции. Екатеринбург: ИМаш УрО РАН, 2009. С. 40.
8. Севастьянов Г. М., Сапченко И. Г. Построение математической модели заливки металла в керамическую форму // Успехи механики сплошных сред: материалы Всероссийской конференции, приуроченной к 70-летию академика В. А. Левина. Владивосток: Дальнаука, 2009. С. 106-107.
9. Севастьянов Г. М., Одинокое В. И., Сапченко И. Г. Исследование особенностей напряженного состояния керамической оболочковой формы в

- процессе заливки расплавом стали // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: материалы Третьей международной конференции DFMN-09. М.: Интерконтакт Наука, 2009. С. 177-178.
10. Севастьянов Г. М. Моделирование процесса заливки стали в оболочковую форму при литье по выплавляемым моделям // Будущее машиностроения России: сборник трудов Второй Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. С. 55-56.
 11. Сапченко И. Г., Жилин С. Г., Севастьянов Г. М. Параметры стойкости керамических оболочковых форм в литье по выплавляемым моделям при затвердевании металла // Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности: материалы VIII Международной научно-практической конференции. СПб.: Политехнический университет, 2009. С. 311-312.
 12. Севастьянов Г. М. К вопросу о критерии разрушения оболочковых форм при заполнении расплавом стали в литье по выплавляемым моделям // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов международной конференции. Воронеж: ВГУ, 2009. Ч. 2. С. 168-170.
 13. Одинокое В. И., Сапченко И. Г., Севастьянов Г. М. Математическое моделирование процесса распространения тепла в КОФ с пористым слоем при заливке и последующей кристаллизации металла // Теория и практика механической и электрофизической обработки материалов: материалы Международной научно-технической конференции. Комсомольск-на-Амуре: КнАГТУ, 2009. С. 137-141.
 14. Севастьянов Г. М. Об одном численном решении термоупругой задачи в несвязанной квазистатической постановке для тонких оболочек // XXXV Дальневосточная математическая школа-семинар имени академика Е. В. Золотова: сборник докладов. Владивосток: ИАПУ ДВО РАН, 2010. С. 655-662.
 15. Севастьянов Г. М. Численная схема решения системы дифференциальных уравнений термоупругости // Математическое, вычислительное и информационное обеспечение технологических процессов и систем: материалы научно-технической конференции. Комсомольск-на-Амуре, 2010. Т. 4. С. 122-125.
 16. Одинокое В. И., Сапченко И. Г., Севастьянов Г. М. Об особенностях заливки форм в литье по выплавляемым моделям // Наука и техноло-

гии: материалы XXIX Российской школы, посвященной 85-летию со дня рождения академика В. П. Макеева. Миасс: МСНТ, 2009. С. 102.

17. Сапченко И. Г., Севастьянов Г. М. Моделирование термического удара струи расплава стали на керамическую форму при заливке // Математическое моделирование в естественных науках: материалы XVIII Всероссийской школы-конференции молодых ученых и студентов. Пермь: ПГТУ, 2009. С. 86-87.
18. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2010611774 «Математическое моделирование процессов заливки и затвердевания стали в многослойной огнеупорной керамической форме со слоями пористой керамики» / В. И. Одинокоев, И. Г. Сапченко, Г. М. Севастьянов. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 05.03.2010.

Личный вклад автора. Работы [4, 7, 10, 12, 14, 15] выполнены автором лично. В остальных работах в рамках сформулированных научным руководителем проблем автором разработана численная схема, алгоритмы, программы для решения задач, произведен анализ численных решений.

Севастьянов Георгий Мамиевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ ПРИ ЗАЛИВКЕ И ЗАТВЕРДЕВАНИИ МЕТАЛЛА В
КЕРАМИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКОВОЙ ФОРМЕ

Автореферат

Подписано к печати 10.10.2011

Усл. печ. л. 1

Уч.-изд. л. 0.8

Формат 60x84/16

Тираж 100 экз.

Заказ №100

Издано в ИМиМ ДВО РАН. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1

Отпечатано участком оперативной печати ИМиМ ДВО РАН.

Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1