

Светушков Николай Николаевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ
НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ
В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

Специальности:

05.13.18 - Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

05.16.09 - Материаловедение (в машиностроении)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении
высшего профессионального образования
«Московский авиационный институт
(государственный технический университет)».

Научные руководители: кандидат физико-математических наук,
профессор Третьякова Ольга Николаевна,
доктор технических наук,
профессор Белашова Ирина Станиславовна

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Ципенко Антон Владимирович,
кандидат технических наук,
Ливанова Ольга Викторовна

Ведущая организация: Объединенный институт высоких температур
РАН

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2010 г. года
в _____ часов _____ мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.15 при
Московском государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана
по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью
организации, просим высылать по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская
ул., д.5, МГТУ им. Н.Э.Баумана, ученому секретарю совета Д 212.141.15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ
им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «_____» _____ 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник, доцент



Аттетков А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Процессы теплопередачи играют огромную роль при работе разнообразных технических устройств и промышленного оборудования, также они чаще всего определяют физико-химические процессы, происходящие в различных технологических циклах. Кроме этого, надежность различных промышленных изделий, а также отдельных узлов и деталей, в значительной степени зависит от температурных режимов, при которых эти изделия и их отдельные части эксплуатируются. Поэтому не случайно вопросам теплопередачи посвящено большое количество работ и публикаций, а исследования, относящиеся к процессам теплообмена, имеют более чем двухсотлетнюю историю.

Большая область применения задач моделирования лежит в таком разделе инженерной науки, как материаловедение, занимающееся изучением структурных преобразований в материалах. Как известно, структурные и фазовые изменения, происходящие в твердом состоянии, определяют физико-механические и эксплуатационные свойства изделия и зависят от видов химико-термической обработки, температуры нагрева и скоростей охлаждения. Например, при термической обработке сталей температуры нагрева должны находиться в области аустенизации, а от скоростей охлаждения зависит структура обрабатываемого участка. Высокие скорости охлаждения способствуют получению крайне мелкозернистой структуры, вплоть до наноразмерной области. Моделирование процессов термической обработки объектов с неоднородной внутренней структурой и определение температуры в заданной точке изделия позволит решить задачу структурообразования в реальных изделиях, что является востребованным и актуальным. Такие технологические процессы могут быть существенным образом оптимизированы за счет создания адекватной физической и математической моделей и проведения серии вычислительных экспериментов.

В связи с этим **актуальной** является задача получения надежных данных по распределению температурных полей в геометрически сложных неоднородных объектах при различных начальных и граничных условиях. Причем существенную роль играет динамическое поведение системы под воздействием меняющихся внешних условий.

Сложность поставленной задачи состоит в необходимости решения следующих проблем:

- разработки специализированных программных средств, позволяющих описывать различные теплофизические задачи, в том числе задавать теплофизические характеристики модели, а также начальные условия, распределение источников и стоков теплоты, и различные типы граничных условий, зависящих от времени;
- разработки устойчивых алгоритмов для решения задач нестационарной теплопроводности в неоднородных средах;

- применение алгоритмов, обеспечивающих возможности проведения параллельных вычислений с целью использования многопроцессорных систем для уменьшения времени расчета модельных задач;
- анализа точности получаемых расчетных величин и их соответствие экспериментальным данным.

Таким образом, существует проблема получения адекватных расчетных данных по динамическому изменению температуры и тепловых потоков в неоднородных изделиях за приемлемое вычислительное время. Решение этой проблемы актуально для различных прикладных задач в энергетике, алюминиевой и сталелитейной промышленности, машиностроении и других областях теплотехники и материаловедения, и является в высшей степени востребованной.

Предметом исследования являются математические методы решения двумерных нестационарных уравнений теплопроводности, оценка точности получаемых результатов, принципы геометрического моделирования сложных объектов, а также программные средства визуализации и расчета нестационарных тепловых процессов в неоднородных средах и их применение для прикладных задач материаловедения.

Целью работы является создание интерактивного программного продукта для расчета температурных полей в двумерных областях со сложной геометрией и средах с неоднородными теплофизическими свойствами (гетерогенные среды).

Задачами исследования являются:

- анализ методов и расчетных схем, используемых при численном решении двумерных уравнений в частных производных, в частности, для уравнений теплопроводности;
- вывод интегральных и интегро-дифференциальных уравнений для описания теплофизических процессов, а также алгоритмов их численного решения;
- описание универсального подхода к геометрическому представлению сложных объектов, при котором формирование области модели происходит путем объединения областей входящих в него элементарных объектов (кластерное моделирование);
- реализация принципов геометрического моделирования в программном комплексе для создания сложных двумерных объектов;
- разработка программной среды, позволяющей проводить расчеты задач нестационарной теплопроводности для геометрически сложных неоднородных изделий.

Методы исследования. При разработке формальных моделей в диссертации использовались методы и модели математического анализа, численного моделирования, методы линейной алгебры и теории вычислений, методы решения уравнений математической физики и др. При написании программной среды использовался язык программирования Visual C++,

средства разработки интерфейсов на основе библиотек MFC, а также средства визуализации данных DirectX.

Научная новизна работы состоит в разработке новых методов решения нестационарных задач теплопроводности и способов проектирования геометрических объектов:

- получена система интегро-дифференциальных уравнений для тепловых потоков, описывающая нестационарный процесс теплопроводности в неоднородных средах в двумерном случае;
- предложен итерационный алгоритм численного решения задачи теплопроводности, позволяющий свести решение многомерной задачи в сложной геометрической области к итерационному решению системы взаимосвязанных одномерных задач (метод интегральной декомпозиции);
- разработан метод оценки точности найденных распределений температур и тепловых потоков на основе анализа невязки в системе интегральных уравнений и вычисления коэффициента обусловленности для системы одномерных задач;
- сформулированы принципы описания геометрии сложных объектов с использованием кластерного подхода, при котором область модели формируется на основе объединения набора областей элементарных объектов;
- создана программная среда по моделированию тепловых процессов для широкого круга практических задач теплотехники и материаловедения;
- решены ряд задач по прогреву композиционных материалов и нахождению в них динамически меняющихся распределений температур, проведены модельные расчеты для задачи термообработки прокатных валков и задачи лазерной термообработки - прогрева поверхности инструмента с нанесенным покрытием из тугоплавких компонентов для получения структурированных упрочняющих фаз.

Достоверность результатов подтверждена проведением аналитических исследований и вычислительных экспериментов, а также сравнением полученных расчетных данных с известными результатами.

Практическая ценность полученных результатов состоит в возможности их использования при математическом моделировании широкого круга теплофизических процессов в сложных геометрических объектах для задач теплотехники, а также материаловедения, в которых процессы структурных (эвтектоидных) изменений существенным образом зависят от текущего распределения температур в изделии. Совокупность научных положений, идей и практических результатов представляет интерес для теоретических и практических методов исследования теплофизических процессов в сложных неоднородных системах, а также при решении задач материаловедения.

На защиту выносятся следующие положения:

1. формализованное описание процесса распространения теплоты через систему интегро-дифференциальных уравнений типа Вольтерра второго рода для тепловых потоков;
2. кластерный подход геометрического моделирования сложных двумерных объектов;
3. численный алгоритм решения нестационарного уравнения теплопроводности для двумерного случая, основанный на декомпозиции полученных интегро-дифференциальных уравнений, позволяющий использовать многопроцессорные системы;
4. интегрированная программная среда, в которой реализованы методы расчета теплофизических процессов, разработан интерфейс для описания сложных геометрических объектов, и разработаны программные модули для проведения вычислений и визуализации получаемых результатов.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на научных семинарах под рук. акад. РАН И.Г.Горячевой (Институт проблем механики РАН, 2008) и д.т.н. В.В.Лунова (ЦНИИ машиностроения, 2010), научном семинаре кафедры «Молекулярная физика» МГУ им. М.В.Ломоносова под рук. д.ф.-м.н. И.А.Знаменской (2009), XIV и XV международных симпозиумах «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им.А.М. Горшкова (Ярополец; 2008, 2009), VIII международной конференции «Авиация и космонавтика» (Москва, 2009), VII международной конференции ВМСПП'2009 (Алушта, 2009), IV международной конференции по моделированию тепловых процессов ICTMCS-2010 (Шанхай, 2010), V российской национальной конференции по теплообмену РНКТ-5 (Москва, 2010).

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 14 научных статьях, в том числе в 5 статьях Перечня ведущих научных журналов и изданий ВАК РФ, и в 8 тезисах докладов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы и Приложения. Диссертационная работа изложена на 165 страницах, содержит 60 иллюстраций, 2 таблицы и Приложение на 12 страницах. Библиография включает 119 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы. Ставятся цели и задачи исследований. Приводится краткое содержание глав диссертации.

В первой главе проведен анализ математических методов, моделей и способов описания задач распространения теплоты. Для существующих методов решения задачи теплопроводности изучены преимущества и недостатки каждого из подходов.

В первом разделе рассматриваются способы описания процессов теплообмена и подходы к решению задач теплопроводности. Дается обзор существующих численных методов решения уравнений в частных производных и делается вывод, что вычислительная сложность поставленной математической задачи во многих случаях не позволяет получать информацию о происходящих теплофизических процессах для геометрически сложных и протяженных объектов.

Во втором разделе первой главы исследованы современные способы компьютерного описания геометрических моделей. Отмечается, что при проектировании изделия большие сложности вызывает сам процесс создания геометрических объектов. Существующие программные средства (например, 3D-MAX, ANSYS, T-FLEX, MAYA, CATI и др.) основаны в своем большинстве на идеологии *конкатенации* поверхностей, в которой пользователем задаются координаты точек поверхности изделия, которые и используются для отображения объекта.

Во второй главе рассматривается разработанный интегральный метод описания процесса распространения теплоты, при котором уравнения в частных производных приводятся к системе интегро-дифференциальных уравнений типа Вольтерра второго рода для тепловых потоков. Преимущество выведенных интегральных уравнений, в правых частях которых содержатся начальные и граничные условия задачи, состоит в том, что они позволяют не только учесть вид граничной области, но и понизить требования к гладкости искомого решения.

Дифференциальные уравнения теплопроводности в двумерном случае для неоднородной среды имеют следующий вид (коэффициенты теплопроводности зависят от пространственных переменных):

$$c\rho(x, y)\frac{\partial}{\partial t}u(x, y, t) = \frac{\partial}{\partial x}k_x(x, y)\frac{\partial}{\partial x}u(x, y, t) + \frac{\partial}{\partial y}k_y(x, y)\frac{\partial}{\partial y}u(x, y, t) + q(x, y, t) \quad (1)$$

с начальным

$$u(x, y, 0) = f(x, y), x \in \Omega \quad (2)$$

и граничными условиями, при которых на одной части границы может быть задана температура, а на другой – тепловые потоки (зависящие от времени):

$$u(x, y, t)|_{\Gamma_1} = \phi(t), k \frac{\partial u(x, y, t)}{\partial n}|_{\Gamma_2} = w(t). \quad (3)$$

Функция $q(x, y, t)$ описывает распределение плотности мощности тепловых источников (или стоков). Способ вывода интегральных уравнений для

одномерного случая представлен *во втором разделе*. Здесь рассматриваются четыре типа возможных граничных условий:

- в граничных точках заданы температуры;
- в граничных точках заданы тепловые потоки;
- в одной из точек задана температура, а в другой – тепловой поток.

В третьем разделе второй главы получены интегро-дифференциальные уравнения для тепловых потоков в двумерном случае и показана их эквивалентность исходным уравнениям в частных производных. Для случая, когда на границе заданы тепловые потоки, интегральные уравнения и вспомогательные функции принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} & \int_0^t W_x(x, y, \tau) d\tau + \underline{p}_x(x, y) \int_x^{\bar{x}} c\rho(\xi, y) \int_{\underline{x}}^{\xi} \frac{1}{k_x(\eta, y)} W_x(\eta, y, t) d\eta d\xi - \\ & - \bar{p}_x(x, y) \int_{\underline{x}}^x c\rho(\xi, y) \int_{\underline{x}}^{\xi} \frac{1}{k_x(\eta, y)} W_x(\eta, y, t) d\eta d\xi + \\ & + \bar{p}_x(x, y) \int_0^t \int_{\underline{x}}^x \frac{\partial W_y(\xi, y, \tau)}{\partial y} d\xi d\tau - \underline{p}_x(x, y) \int_0^t \int_x^{\bar{x}} \frac{\partial W_y(\xi, y, \tau)}{\partial y} d\xi d\tau = \\ & = \bar{p}_x(x, y, t) \underline{\phi}_x(x, y, t) - \underline{p}_x(x, y, t) \bar{\phi}_x(x, y, t); \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \underline{p}_x(x, y) &= \left[\int_{\underline{x}}^x c\rho(\xi, y) d\xi \right]^{-1} \int_{\underline{x}}^x c\rho(\xi, y) d\xi; \\ \bar{p}_x(x, y) &= \left[\int_x^{\bar{x}} c\rho(\xi, y) d\xi \right]^{-1} \int_x^{\bar{x}} c\rho(\xi, y) d\xi; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \underline{\phi}_x(x, y, t) &= \int_{\underline{x}}^x c\rho(\xi, y) f(\xi, y) d\xi + \int_0^t W_x(x(y), \tau) d\tau + \int_{\underline{x}}^x \int_0^t q(\xi, y, \tau) d\xi d\tau; \\ \bar{\phi}_x(x, y, t) &= \int_x^{\bar{x}} c\rho(\xi, y) f(\xi, y) d\xi - \int_0^t W_y(\bar{x}(y), \tau) d\tau + \int_x^{\bar{x}} \int_0^t q(\xi, y, \tau) d\xi d\tau. \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнения для потоков вдоль оси y записываются симметричным образом. Неизвестными функциями являются тепловые потоки, определив которые, можно вычислить распределение температур в каждый момент времени. Интегральное описание обеспечивает устойчивое поведение искомого приближения и дает возможность оценить погрешность дискретизации, а также провести оценку точности получаемого численного результата.

Четвертый раздел второй главы содержит описание способа дискретизации интегральных уравнений, при котором выводятся алгебраические уравнения для сеточных функций средних тепловых потоков. Как известно, определенный интеграл может быть корректно аппроксимирован численными схемами различного порядка точности – методом трапеций и методами Ньютона-Котеса. Предлагаемый способ дискретизации, основанный на использовании усредненных значений, обладает дополнительным преимуществом, заключающимся в возможности

решать задачи теплопроводности на сетках с крупным шагом (дискретизация уравнений в частных производных требует использования сеток с малыми шагами по пространственным и временным переменным).

В пятом разделе второй главы рассматриваются алгоритмы решения линейных систем, возникающих при дискретизации задач теплопроводности.

В шестом разделе второй главы дано описание разработанного алгоритма декомпозиции, который позволяет свести систему связанных интегро-дифференциальных уравнений к независимому набору одномерных интегральных уравнений для тепловых потоков, и, таким образом, найти решение исходной системы методом итераций.

Для размыкания системы вводится понятие «эффективного» внешнего источника (стока) теплоты, определяемого как производная от тепловых потоков в направлении потока. Предполагая, что этот источник известен, и перенося соответствующий член в правую часть исходной системы, приходим к набору независимых уравнений, каждое из которых может решаться на отдельном процессоре. На следующем этапе происходит перерасчет мощности внешнего «эффективного» источника по найденному решению и процедура итерационно повторяется. Выполненные расчеты для различных задач показывают, что сходимость предлагаемого алгоритма достаточно быстрая (~ 10 -50 итераций для достижения максимальной машинной точности 10^{-15}).

В седьмом разделе второй главы приводится способ оценки точности приближенного решения, основанный на вычислении невязки для данного приближения в системе одномерных интегральных уравнений.

В восьмом разделе второй главы содержится сравнительный анализ вычислительных затрат при решении двумерной задачи теплопроводности различными методами конечных разностей: 27-точечный шаблон, 11-точечный шаблон, и предлагаемым алгоритмом интегральной декомпозиции. Показано, что предлагаемый алгоритм, например, для сеточной области из $10^2 \cdot 10^2$ точек приводит к необходимости решения 200 задач размерности $10^2 \cdot 10^2$ (размерность исходной двумерной задачи составляет $10^4 \cdot 10^4$), которые могут быть эффективно решены на многопроцессорных системах с большой степенью распараллеливания.

В третьей главе рассматриваются методы геометрического проектирования, основанные на разработанном автором методе – кластерном моделировании.

В первом разделе третьей главы содержится общее описание нового подхода, при котором геометрическая модель (и ее граница) формируется в результате взаимного объединения элементарных областей, описываемых кластерными элементами.

Существующие методы описания геометрических объектов, основанные на различных способах задания вида границы или параметризации элементарных фигур, принципиальным образом отличаются от подхода, предлагаемого в настоящей диссертации, при котором задаются

не граничные точки, а внутренние точки объекта – элементы кластера, а положение граничных точек вычисляется программной средой.

Использование кластерных элементов для параметризации геометрической области позволяет описать достаточно произвольную континуальную область путем задания дискретного набора элементов – $P_1, P_2, \dots, P_n$. При таком подходе граничная область модели вычисляется по определенным правилам, которые включаются в описание кластерных элементов (несущих точек); их объединение формирует единый взаимосвязанный объект - кластерную модель.

Предложенная структура кластерного элемента содержит информацию о четырех базовых направлениях и четырех граничных точках, каждая из которых включает данные по двум граничным направлениям. Кроме того, в граничных точках содержится информация о правилах объединения (типе соединяющей граничной линии). Таким образом, вид элементарной области, генерируемой вокруг несущей точки, определяется положением несущего элемента и 12-ю дополнительными параметрами – длиной базовых направлений и углами касательных.

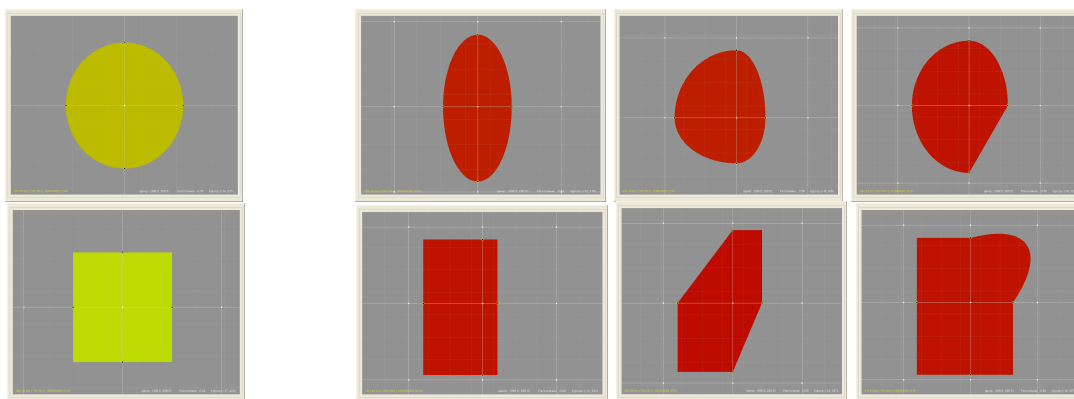


Рис. 1. Одноэлементный кластер

Отличительной особенностью кластерного подхода является то, что при создании классических геометрических фигур на плоскости (окружности, эллипса, квадрата, прямоугольника и др.) достаточно использование кластера всего лишь из одного элемента (рис.1). Моделирование с помощью кластерного подхода естественным образом предоставляет возможность задавать в элементарных областях различные физические параметры модели (плотность, теплоемкость, теплопроводность и др.), которые присваиваются несущим (кластерным) точкам.

Во втором разделе третьей главы содержится пример построения сложных двумерных объектов на основе разработанных программных средств. Представленные на рис. 2 фигуры (профиль крыла, модель обода колеса, а также сложные фрактальные объекты):

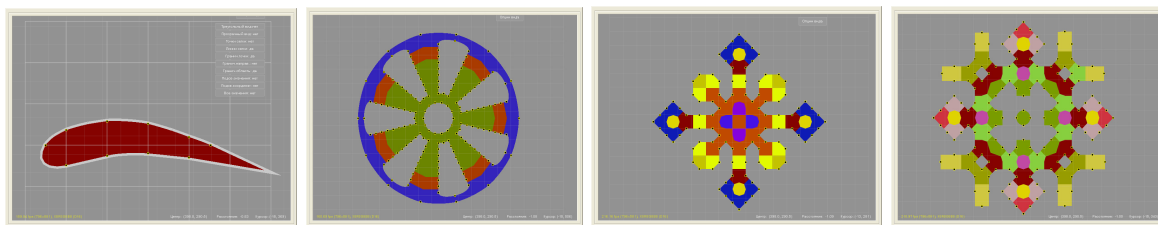


Рис. 2. Сложные двумерные объекты, созданные в разработанной программной среде кластерного моделирования

могут быть созданы в среде CLUSTERS_2D даже неподготовленными пользователями, используя интуитивно понятный интерфейс программы.

В третьем разделе третьей главы рассматриваются вопросы, связанные с программной реализацией кластерного представления - с визуализацией геометрических образов в среде Microsoft Windows XP и программированием интерактивных возможностей оболочки. Программа написана на языке программирования высокого уровня Visual C++ с использованием средств визуального отображения, основанных на наборе динамических библиотек DirectX 9.0 и специальных средств DirectX SDK. Основанием для использования языка программирования C++ является возможность реализовывать собственные классы на основе существующих в библиотеке MFC, а также богатые возможности по написанию интерфейсов на базе технологии COM (Component Object Model).

В четвертом разделе третьей главы содержится описание возможностей программного комплекса по созданию теплофизической модели и выполнению численных расчетов.

В четвертой главе содержится описание моделируемых тепловых процессов термообработки и расчета прикладных задач теплотехники. Здесь же проведено сравнение расчетов с точным аналитическим решением:

- сравнительный тестовый расчет охлаждения стального цилиндра;
- расчет теплового воздействия на композиционные материалы с целью определения стационарного распределения температурных полей и вычисления их коэффициентов эффективной теплопроводности;
- моделирование процессов поверхностной закалки геометрически сложных изделий – прокатных валков;
- применение теплофизических расчетов при лазерном модифицировании поверхности.

В первом разделе четвертой главы выполнено сравнение аналитического решения по охлаждению (остыванию) однородного стального цилиндра и результатов расчета на основе разработанного алгоритма. Численные расчеты показывают, что относительная ошибка находится в пределах 1%, что связано с погрешностями дискретизации системы интегральных уравнений.

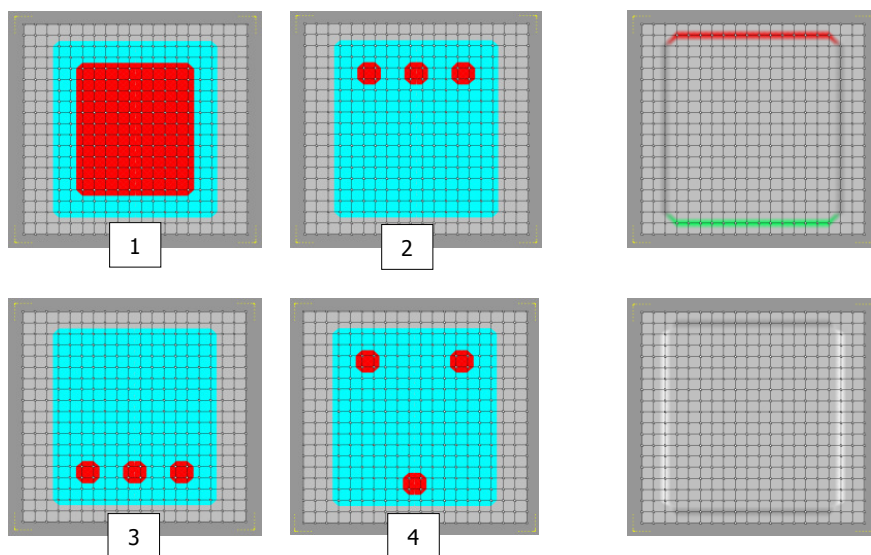


Рис.3. Различные типы расположения армирующих волокон в композитном материале и граничные условия для задачи прогрева

Во втором разделе четвертой главы проведен анализ прогрева теплоизолирующего композиционного материала с армирующими волокнами.

Высокопористые композиционные материалы находят широкое применение в различных системах тепловой защиты. На рис. 3 показаны типы армирования теплоизолирующего композиционного материала в поперечном направлении волокнами, а на рис. 4 - результаты расчета прогрева данного композита.

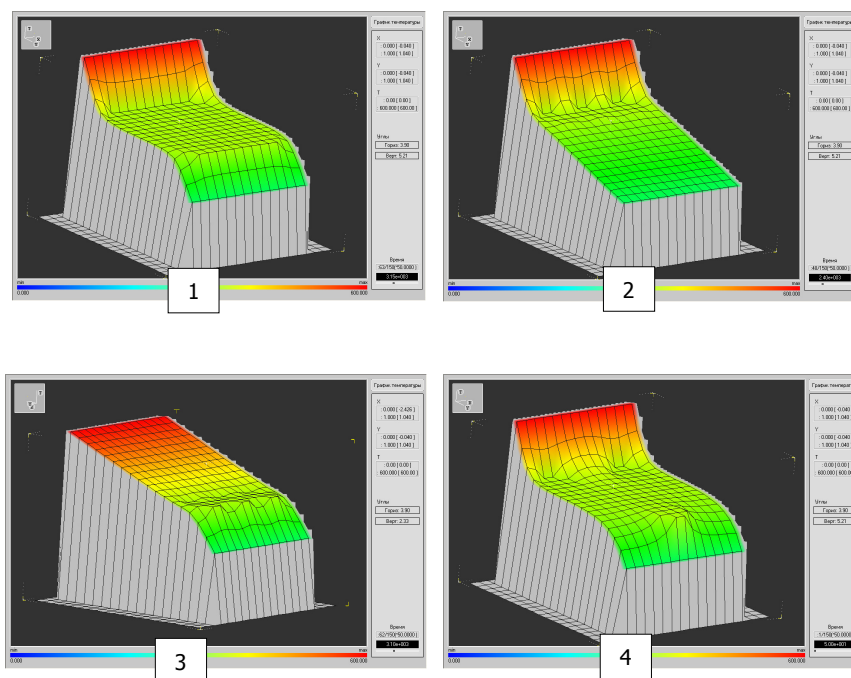


Рис.4. Распределение температур в стационарном режиме прогрева при различных типах армирования

Для выполнения расчетов была поставлена задача со смешанными граничными условиями – постоянные температуры на противоположных гранях (разность температур – 200°C) и условие адиабатичности на боковых.

Наличие в составе композита материала с высокими коэффициентами теплопроводности и теплоемкости приводит к появлению ярко выраженных участков с неравномерным распределением температуры. Таким образом, эффективные коэффициенты теплопроводности не в полной мере описывают характер распределения температурных полей в композиционных материалах, и при конструировании технических изделий необходимо учитывать наличие в них областей с большими градиентами температур.

В третьем разделе четвертой главы рассмотрена задача закалки прокатного вала при термической обработке, которая, в общем случае, должна учитывать изменение теплофизических характеристик в процессе структурных изменений (коэффициентов теплоемкости и теплопроводности).

Целью моделирования является определение динамического распределения тепловых полей по толщине изделия, что позволит прогнозировать структуру упрочненного слоя, и, следовательно, даст возможность подобрать такие режимы термической обработки, которые обеспечат требуемые прочностные характеристики изделия.

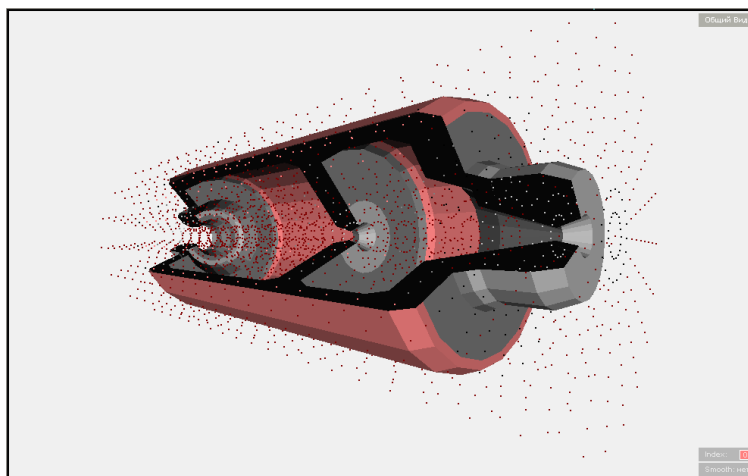


Рис. 5. Общий вид трехмерной модели вала, созданной на основе кластерного подхода

Для расчетов выбран опорный валок из сталей 9Х2 или ШХ15 в условиях индукционной закалки ТПЧ (см. рис.5). Заводская технология термообработки прокатного вала состоит в следующем: сначала производится предварительный печной подогрев вала до 540°C , затем индукционный прогрев поверхности до 920°C , а потом полное спрейное охлаждение водой в течении 45 минут. Индукционный нагрев моделировался заданием постоянного теплового потока на поверхности вала. Процесс

аустенизации сопровождается поглощением теплоты, что учитывалось путем ввода распределенных стоков теплоты в поверхностном слое.

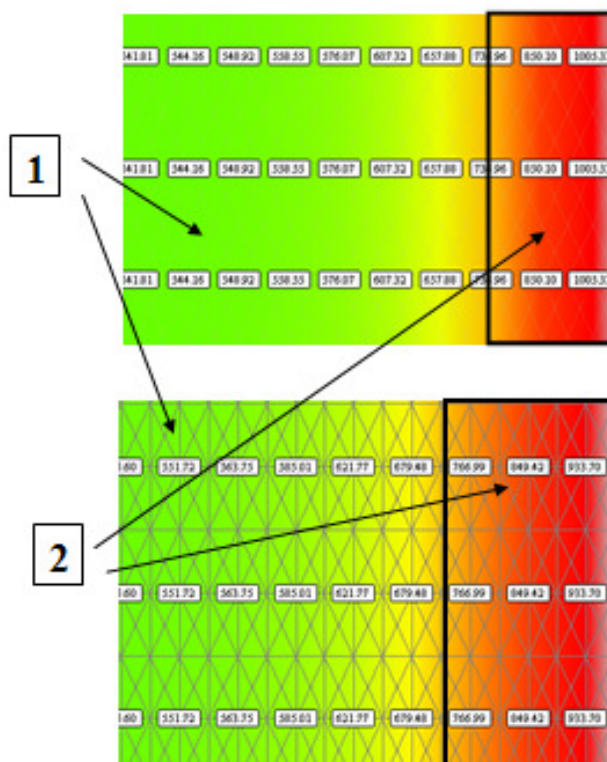


Рис. 6. Расчеты по изменению глубины прогрева при различных коэффициентах теплопроводности поверхностного слоя: 1 – перлитная область, 2 – область аустенизации ($T > 740^{\circ}\text{C}$)

Для исследования влияния меняющихся теплофизических характеристик на распределение температуры в поверхностном слое вала была рассчитана глубина проникновения (нагрев свыше 740°C) при различных коэффициентах теплопроводности (20 и 40 Вт/(мК)) в поверхностном слое толщиной 0.04 м.

Результаты вычислений показаны на рис.6., откуда видно, что учет неоднородности приводит к увеличению глубины проникновения на ~25%, и понижению температуры поверхности на 70°C .

Технологические процессы закалки крупногабаритных валков состоят в индукционном нагреве и охлаждении поверхности движущимся индуктором и спреером. Результаты проведенных расчетов показаны на рис. 7. Для расчетов также использовалась модель неоднородной среды, в которой поверхностный слой (40 мм) имел более высокую теплопроводность.

Вычисленные температурные поля показывают, что за движущимся индуктором образуется характерный шлейф с пониженной температурой, изменяющейся в пределах от 100°C до 300°C .

теплопроводности материала инструмента. Время расчета ограничивалось временем достижения температуры плавления.

Полученные в результате проведенных расчетов распределения тепловых потоков и температур показывают, что прогрев идет в основном в поверхностном слое, и линейные размеры прогреваемой зоны в 5-6 раз больше, чем глубина (см. рис.9).

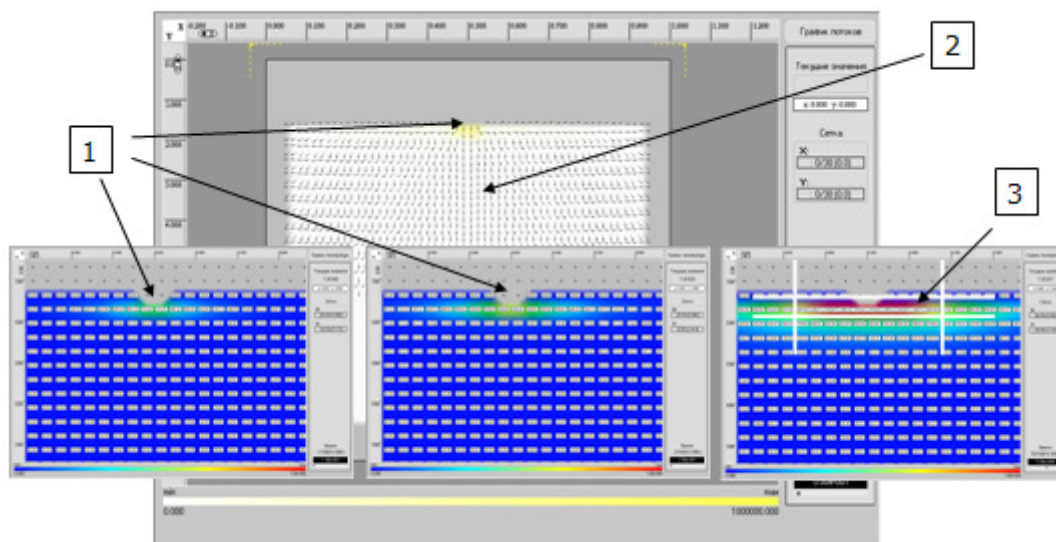


Рис. 9. Модельные расчеты по динамике изменения температуры поверхностного слоя при лазерном нагреве: 1 – область лазерного воздействия, 2 – рассчитанные тепловые потоки, 3 – зона термического влияния ($T > 720^{\circ}\text{C}$)

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертации были получены следующие результаты:

1. Получены интегральные уравнения типа Вольтерра второго рода, описывающие процесс теплопроводности в неоднородных средах в одномерном случае.
2. Выведена система интегро-дифференциальных уравнений для задач теплопроводности в геометрически сложной двумерной области с произвольными начальными и граничными условиями.
3. Предложен алгоритм решения полученной системы, позволяющий свести решение двумерной задачи к итерационному решению независимого набора одномерных задач, что позволяет в большой степени использовать многопроцессорные системы.
4. На основе разработанных алгоритмов создан программный комплекс для выполнения расчетов по динамическому прогреву различных неоднородных систем.

5. Проведены тестовые расчеты по охлаждению цилиндра, прогрева многокомпонентных систем, а также моделированию термической закалки прокатных валков и лазерной термообработки аморфного покрытия металла.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

1. Светушков Н.Н., Белашова И.С. Расчетные модели гетерогенных структур при динамически изменяющихся параметрах времени и мощности тепловых воздействий // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XIV международного симпозиума им. А.Г. Горшкова. М., 2008. С. 161-164.
2. Светушков Н.Н., Белашова И.С. Математическое моделирование теплофизических процессов образования упрочняющих фаз при дисперсионном твердении в жаропрочных сталях // Материалы международной конференции NPNJ'2008. М., 2008. С. 372-374.
3. **Белашова И.С., Светушков Н.Н. Теплофизические процессы образования нанокластерных структур в аморфных покрытиях и проблемы их моделирования // Вестник Московского автомобильно-дорожного института (гос. техн. ун-та). 2009. Вып. 4. С. 55-59.**
4. Белашова И.С., Светушков Н.Н., Тарасова Т.В. Исследование кинетики массопереноса и моделирование фазового перехода при лазерном легировании конструкционных сталей углеродом и кремнием // Современные методы получения и исследования наноструктурных материалов и покрытий: Сборник научных трудов. М., 2009. С. 148-160.
5. Светушков Н.Н., Белашова И.С. Моделирование теплофизических условий образования и роста нанокластерных структур в аморфных покрытиях // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XIV международного симпозиума им. А.Г. Горшкова. М., 2009. Т.2. С. 8-11.
6. Светушков Н.Н., Белашова И.С. Компьютерное моделирование термических процессов образования и роста нанокластерных структур // Материалы XVI международной конференции ВМСПП'2009. М., 2009. С. 632-635.
7. Белашова И.С., Светушков Н.Н. Физические модели твердофазных процессов образования и роста наноразмерных кластерных структур // Проблемы нелинейной механики деформируемого твердого тела: Труды II международной конференции. Казань, 2009. С. 59-61.
8. **Светушков Н.Н., Третьякова О.Н. О моделировании процессов лазерного нагрева поверхностей материалов // Приборы. 2009. № 8. С. 59-63.**

9. Светушков Н.Н., Третьякова О.Н. О моделировании теплопереноса в двумерных гетерогенных областях для получения слоистых композиционных материалов с заданными физическими свойствами // 8-я Международная конференция Авиация и космонавтика-2009: Сб. М., 2009. С. 79-80.
10. Светушков Н.Н., Третьякова О.Н. Проблемы моделирования взаимодействия лазерного излучения с анизотропными средами и композиционными материалами // Труды МАИ. Электронный журнал, ISSN: 1727-6942. 2010. № 40.
11. Светушков Н.Н., Третьякова О.Н. Проблемы численного моделирования теплообмена в геометрически сложных объектах // Труды пятой российской национальной конференции по теплообмену РНКТ-5: Сб. М., 2010. Т.1. С. 97-100.
12. Светушков Н.Н. Кластерная модель геометрического описания сложных объектов // САПР и графика. 2010. № 3. С. 86-88.
13. Светушков Н.Н. Моделирование процессов поверхностной закалки геометрически сложных изделий // Технология металлов. 2010. № 3. С. 23-29.
14. Svetushkov N. Geometric integral methods in simulation of thermal processes // 4th International Conference on Thermal Process Modeling and Computer Simulation. Shanghai, 2010. P. 60-61.

Светушков Николай Николаевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ
НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ
В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

Специальности:

05.13.18 - Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

05.16.09 - Материаловедение (в машиностроении)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 03.11.2010г.

Усл.п.л. – 1.0

Заказ № 02906

Тираж: 100экз.

Копицентр «ЧЕРТЕЖ.ру»

ИНН 7701723201

107023, Москва, ул.Б.Семеновская 11, стр.12

(495) 542-7389

www.chertez.ru