

На правах рукописи



Нагорнова Татьяна Александровна

**ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ
СЛОЕ МЕТАЛЛА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ
ЭЛЕМЕНТОВ ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС**

Специальность 05.14.14 – тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты,
01.04.14 – теплофизика и теоретическая
теплотехника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2006

Диссертация выполнена в Томском политехническом университете.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Кузнецов Гений Владимирович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Кузин Александр Яковлевич

кандидат технических наук, доцент
Озерова Ирина Петровна

Ведущая организация: ВНИИ атомного энергетического машиностроения

Защита состоится 28 декабря 2006 года в 15.00 часов на заседании диссертационного совета К 212.269.04 при Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, ауд. 406 (4 корпус ТПУ).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «27» декабря 2006 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



А.С. Заворин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Большинство элементов конструкции тепломеханического оборудования ТЭС (паропроводы, корпуса и лопатки паровых и газовых турбин, водяные экономайзеры, пароперегреватели, основные агрегаты системы подготовки топлива и др.) работают в условиях интенсивных механических нагрузок и высоких температур. В результате имеет место эрозия поверхностей деталей и элементов конструкций. Выход из строя какой-либо части оборудования может повлечь за собой прекращение процесса производства электрической (а во многих случаях и тепловой) энергии. Наиболее частыми причинами аварий рабочих деталей тепломеханического оборудования являются термомеханическая усталость металла, коррозионная усталость, капельная эрозия. На стадии проектирования систем и агрегатов ТЭС одной из важнейших задач является выбор материалов для изготовления элементов конструкции оборудования ТЭС, обеспечивающих работоспособность и минимальный износ этого оборудования. Переход на использование дорогостоящих тугоплавких и жаростойких металлов и сплавов экономически нецелесообразен в теплоэнергетике. Наиболее перспективным является использование в теплоэнергетике деталей из обычных сталей, но с упрочненным приповерхностным слоем. В этом случае достигаются существенно более высокие эксплуатационные характеристики узлов и блоков тепломеханического оборудования ТЭС при умеренном удорожании технологий производства основного оборудования таких станций. Лазерная термохимическая обработка является одним из перспективных методов упрочнения поверхностных слоев металлов, работающих в условиях интенсивных тепловых и механических нагрузок. Использование этого метода позволяет обеспечить: возможность обработки локальных объемов деталей; незначительные деформации обрабатываемых изделий; получение заданного комплекса физических и механических свойств обрабатываемых деталей путем их легирования различными элементами при лазерном нагреве в очень короткие сроки.

Свойства полученного при упрочняющей лазерной термохимической обработке слоя и определяют работоспособность детали. В настоящее время влияние параметров обработки на характеристики формирующихся слоев исследовано недостаточно. Экспериментальное изучение закономерностей протекания сложного комплекса взаимосвязанных процессов тепломассопереноса в тонком прилегающем к поверхности, нагретом до высоких температур (или даже расплавленном) слое металла является практически нереальным в условиях лазерного воздействия. Эмпирический подбор рациональных значений технологических параметров достаточно трудоёмкий и энергоёмкий процесс. Теплофизические процессы в металлах при воздействии лазерного излучения еще недостаточно хорошо изучены. Математическое моделирование может стать основным методом исследования таких процессов и выделения реального диапазона изменения параметров технологических режимов (интенсивности и продолжительности лазерного воздействия, размеров зоны нагрева, условий тепломассообмена между расплавом и газовой фазой, начального состояния металла и др.).

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка математической модели процесса тепломассопереноса в приповерхностном слое металла при лазерной обработке элементов тепломеханического оборудования ТЭС с учетом движения источника лазерного излучения.

Указанная цель достигается решением следующих задач:

1. Разработка одномерной нестационарной математической модели теплофизических процессов и диффузии при лазерном упрочнении металла в системе «газовая среда-металл», учитывающей температурные зависимости теплофизических свойств и коэффициентов диффузии, а также нелинейные факторы в граничных условиях.
2. Разработка двухмерной, нестационарной, нелинейной математической модели процессов тепломассопереноса при нагреве поверхности металла движущимся лазерным лучом.
3. Проведение численных исследований для определения технологических параметров лазерной обработки, при которых возможно достижение концентраций легирующей компоненты в приповерхностном слое металла, обеспечивающих существенно более высокие прочностные характеристики элементов тепломеханического оборудования ТЭС.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

1. Впервые решена нелинейная нестационарная задача тепломассопереноса в приповерхностном слое металла при лазерной термохимической обработке в среде легирующего газа в рамках двухмерной модели.
2. Численно исследовано влияние основных технологических параметров (плотности теплового потока, времени воздействия лазерного луча и скорости его движения) на распределение легирующей компоненты в приповерхностном слое металла и на глубину легирования.
3. Установлен существенно нестационарный и неоднородный характер распространения тепла и массы в системе «газ-металл» при лазерной обработке.
4. Выделены режимы движения лазерного луча по поверхности упрочняемого материала, при реализации которых возможно достижение высокой концентрации легирующей компоненты в приповерхностном слое металла.

Практическая значимость. Внесен вклад в развитие представлений о режимах лазерной обработки металлов. Результаты диссертационной работы являются теоретической основой для определения технологических параметров термохимического упрочнения элементов тепломеханического оборудования ТЭС и позволяют сформулировать рекомендации по характеру движения лазерного луча с целью получения оптимального профиля концентрации легирующей компоненты в приповерхностном слое металла.

Достоверность полученных результатов. Обоснованность и достоверность результатов численных исследований следует из проведенных проверок используемых методов на сходимость и устойчивость решений на множестве сеток, подтверждается сравнением результатов, полученных при решении классической задачи Стефана аналитическим путем и с помощью численного моделирования.

Автор защищает:

1. Одномерную нестационарную математическую модель теплофизических процессов и диффузии при лазерном упрочнении металла в системе «газовая среда-металл».
2. Результаты численного моделирования тепломассопереноса в приповерхностном слое металла при лазерной термохимической обработке, полученные при решении задачи в одномерной постановке.
3. Двухмерную математическую модель теплофизических процессов и диффузии при нагреве поверхности металла движущимся лазерным лучом.
4. Результаты численного моделирования тепломассопереноса в приповерхностном слое металла при лазерной термохимической обработке, полученные при решении задачи в двухмерной постановке.

Апробация работы: Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XXVII Сибирском теплофизическом семинаре, посвященном 90-летию академика С.С. Кутателадзе (Новосибирск, 1 – 5 октября 2004); Десятой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2 – 3 марта 2004); Международной конференции «Сопряженные задачи механики, информатики и экологии» (Томск, 5 –10 июля 2004); Девятой всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: Экология, Надежность, Безопасность» (Томск, 2003); XI международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии» (Томск, 29 марта – 2 апреля 2005); XII международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии» (Томск, 29 марта – 2 апреля 2005); Международном симпозиуме «Передовые технические системы и технологии» (Севастополь, 9 – 16 сентября 2006); IV российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 23 – 27 октября 2006).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы представлены в трудах вышеперечисленных конференциях, а также в журналах: «Известия Томского политехнического университета», «Физика и химия обработки материалов»; депонированы в ВИНТИ. Всего по материалам диссертации опубликовано 14 работ, 8 из них в соавторстве с доктором физико-математических наук, профессором Г.В. Кузнецовым.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка используемой литературы, включающего 108 наименований, содержит 29 рисунков, 7 таблиц – всего 110 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель работы, показана новизна и практическая ценность полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрено современное состояние проблемы тепломассопереноса в приповерхностном слое металла при лазерной

термохимической обработке. Описаны теоретические и экспериментальные результаты исследования тепловых и диффузионных процессов при лазерном упрочнении. Показано, что, как правило, используются упрощенные одномерные модели тепломассопереноса, либо модели, учитывающие незначительную часть факторов, определяющих протекание процессов тепло- и массопереноса при лазерной обработке металлов. Отмечено, что практически не встречается работ, описывающих насыщение металла легирующим элементом из газовой среды и его упрочнение за счет поступившей в металл легирующей компоненты при воздействии лазерного излучения на материалы. Выявлена необходимость создания математических моделей, описывающих перенос тепла и массы при легировании металла в среде газа, с целью обоснованного выбора технологических параметров лазерной обработки элементов тепломеханического оборудования ТЭС.

Во второй главе представлены физическая и математическая постановка задачи тепломассопереноса в приповерхностном слое металла при лазерной

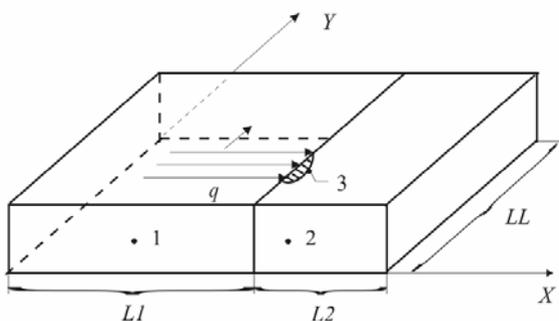


Рис.1 Схема области решения: 1 – газовая среда; 2 – металл; 3 – расплав; $L1$ – толщина слоя газа, $L2$ – толщина металла, LL – длина металлической пластины, q – плотность теплового потока, V – скорость движения лазерного источника.

поверхность металла. При этом происходит нагрев приповерхностного слоя металла и его насыщение легирующим элементом.

При постановке задачи приняты следующие допущения: 1) диапазон температур, при которых проводится лазерная обработка, ограничен температурами испарения металла; 2) давление в газовой фазе не превышает атмосферное; 3) газовая среда принималась однокомпонентной; 4) при достижении температуры плавления на поверхности обрабатываемого металла не происходит выплескивания расплава с поверхности нагрева; 5) вблизи границы «металл-газ» не образуется плазмы в результате пробоя газа.

Тепловой поток считался поверхностным, равномерно распределенным по диаметру лазерного луча. Конвективный теплообмен с газовой фазой не учитывался, поскольку тепловой поток за счет конвекции по сравнению с радиационным составляет не более 3 %.

термохимической обработке. Рассматривается нестационарная нелинейная задача тепломассопереноса в приповерхностном слое металла. Численные исследования проводятся в двухслойной системе «газ – металл» (рис. 1).

Обрабатываемый материал с начальной температурой T_0 находится в среде газа, который используется для легирования металла. Система теплоизолирована. Лазерный луч с плотностью излучения q проходит сквозь газовый слой и воздействует на

При постановке задач, исследуемых в диссертации, учитывался большой ряд значимых факторов. В том числе принималась во внимание возможность дальнейшего применения математических моделей и методов прогностического моделирования, разрабатываемых автором диссертации, для решения практических задач по выбору технологических параметров процессов лазерного термохимического упрочнения деталей тепломеханического оборудования ТЭС.

Насыщение приповерхностного слоя металла легирующим газом возможно как в твердом, так и в жидком состоянии. Переход к состоянию расплава имеет как достоинства, так и недостатки. Например, обработку расплавленного металла можно проводить только при горизонтальном расположении детали, что не всегда возможно и рационально. Но с другой стороны повышение температуры выше $T_{пл}$ приводит к соответствующему повышению величины коэффициента диффузии. В результате увеличивается скорость легирования при прочих адекватных условиях или концентрация легирующей компоненты при постоянном времени обработки. По этим причинам целесообразно создание моделей и соответствующих методов их реализации для диапазона изменения температур, включающего и температуру плавления металла. В этом случае задача существенно усложняется. Но изучение такого варианта изменения технологических параметров представляется интересным и перспективным для металлов и сплавов с относительно низкими температурами плавления.

Решение задачи тепломассопереноса с учетом образования слоя расплава сводится к решению системы уравнений, включающих уравнения теплопроводности (1)–(2), диффузии (3)–(4) и уравнение состояния (5). Тепловой эффект плавления учитывается в уравнении (2).

$$c_1(T_1) \cdot \rho_1(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_1(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial x} \right], \quad 0 < x < L1, \quad (1)$$

$$c_2(T_2) \cdot \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_2(T_2) \frac{\partial T_2}{\partial x} \right] + \frac{Q_{пл} \cdot W}{L_2}, \quad L1 < x < L2, \quad (2)$$

$$\frac{\partial C_1}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_1(T_1) \frac{\partial C_1}{\partial x} \right), \quad 0 < x < L1, \quad (3)$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_2(T_2) \frac{\partial C_2}{\partial x} \right), \quad L1 < x < L2, \quad (4)$$

$$\rho_1 = \frac{P_1 \cdot M_1}{R \cdot T_1}, \quad 0 < x < L1, \quad (5)$$

$$W = \rho_2 \cdot V, \quad (6)$$

где c – теплоемкость; ρ – плотность; T – температура; λ – коэффициент теплопроводности; τ – время; x – координата; L – длина; C_1 – массовая концентрация азота в газе; C_2 – массовая концентрация азота в металле; D –

коэффициент диффузии в газе и металле; P – давление; R – универсальная газовая постоянная; M – молярная масса; W , V – объемная и линейная скорость плавления соответственно. Индексы 1 и 2 соответствуют газу и металлу.

Коэффициенты диффузии принимаются зависящими от температуры.

$$D_1(T_1) = D_{01} \left(\frac{T_1}{273} \right)^{1.5}, \quad (7)$$

$$D_2(T_2) = D_{02} \cdot \exp \left(-\frac{E}{R \cdot T_2} \right), \quad (8)$$

где D_{01} , D_{02} – факторы диффузии в газе и металле; E – энергия активации.

При задании начальных условий считается, что температура двухслойной системы в начальный момент времени постоянна во всех точках:

$$\tau = 0: \quad T_1 = T_2 = T_0, \quad (9)$$

где индекс ноль соответствует начальному состоянию.

Также в начальный момент времени заданы значения массовых концентраций азота в газовой фазе и в металле:

$$C_1 = C_{01}, \quad 0 < x < L1, \quad (10)$$

$$C_2 = C_{02}, \quad L1 < x < L2, \quad (11)$$

В граничных условиях учитываются реальные условия теплообмена. На границе раздела сред «газ – металл» используются граничные условия четвертого рода.

$$x = 0: \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = 0, \quad C_1 = C_{01}, \quad (12)$$

$$x = L1: \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} - A \cdot q - \varepsilon \cdot \sigma (T_2^4 - T_m^4), \quad T_1 = T_2, \quad (13)$$

$$x = L2: \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = 0, \quad C_2 = C_{02}, \quad (14)$$

$$x = L1: \quad D_1 \frac{\partial C_1}{\partial x} = D_2 \frac{\partial C_2}{\partial x}, \quad C_1 = C_2. \quad (15)$$

где q – плотность теплового потока; ε – степень черноты; σ – постоянная Стефана-Больцмана; A – коэффициент поглощения; T_m – средняя температура газа (температура окружающей среды).

Математическая постановка задачи в рамках двумерной модели включает двумерные нестационарные уравнения теплопроводности и диффузии (16-19) для газа и металла, а также уравнение состояния (20).

$$c_1(T_1) \cdot \rho_1(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_1(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_1(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial y} \right], \quad \begin{array}{l} 0 < x < L1, \\ 0 < y < LL, \end{array} \quad (16)$$

$$c_2(T_2) \cdot \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_2(T_2) \frac{\partial T_2}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_2(T_2) \frac{\partial T_2}{\partial y} \right], \quad \begin{array}{l} L1 < x < L2, \\ 0 < y < LL, \end{array} \quad (17)$$

$$\frac{\partial C_1}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_1(T_1) \frac{\partial C_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_1(T_1) \frac{\partial C_1}{\partial y} \right), \quad \begin{array}{l} 0 < x < L1, \\ 0 < y < LL, \end{array} \quad (18)$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_2(T_2) \frac{\partial C_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_2(T_2) \frac{\partial C_2}{\partial y} \right), \quad \begin{array}{l} L1 < x < L2, \\ 0 < y < LL, \end{array} \quad (19)$$

$$\rho_1 = \frac{P_1 \cdot M_1}{R \cdot T_1}. \quad \begin{array}{l} 0 < x < L1, \\ 0 < y < LL, \end{array} \quad (20)$$

Начальные условия:

$$\tau = 0: \quad \begin{array}{l} T(x, y) = T_0, \quad C_1(x, y) = C_{01}, \\ 0 \leq x \leq L1, \\ 0 \leq y \leq LL, \end{array} \quad (21)$$

$$\begin{array}{l} T(x, y) = T_0, \quad C_2(x, y) = C_{02}, \\ L1 \leq x \leq L2, \\ 0 \leq y \leq LL. \end{array} \quad (22)$$

В граничных условиях учитывается теплоизоляция системы и радиационный теплообмен, движение лазерного луча учитывается параметрически с помощью функции $q(\tau, y)$ в граничном условии (24).

Граничные условия:

$$x = 0: \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = 0, \quad C_1 = C_{01}, \quad 0 \leq y \leq LL, \quad (23)$$

$$x = L1: \quad \lambda_1(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_2(T_2) \frac{\partial T_2}{\partial x} - A \cdot q(\tau, y) - \varepsilon \cdot \sigma (T_2^4 - T_m^4) \quad 0 \leq y \leq LL, \quad (24)$$

$$T_1 = T_2,$$

$$x = L2: \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = 0, \quad 0 \leq y \leq LL, \quad (25)$$

$$y = 0: \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = 0, \quad D_1 \frac{\partial C_1}{\partial x} = 0, \quad 0 \leq x \leq L1, \quad (26)$$

$$y = 0: \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} = 0, \quad D_2 \frac{\partial C_2}{\partial x} = 0, \quad L1 \leq x \leq L2, \quad (27)$$

$$y = LL: \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = 0, \quad D_1 \frac{\partial C_1}{\partial x} = 0, \quad 0 \leq x \leq L1, \quad (28)$$

$$y = LL: \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} = 0, \quad D_2 \frac{\partial C_2}{\partial x} = 0, \quad L1 \leq x \leq L2, \quad (29)$$

$$x = L1: \quad D_1(T) \frac{\partial C_1}{\partial x} = D_2(T) \frac{\partial C_2}{\partial x}, \quad C_1 = C_2, \quad 0 \leq y \leq LL, \quad (30)$$

Системы нелинейных дифференциальных уравнений (1)–(5) и (16)–(20) теплопроводности и диффузии для слоев металла и газа с соответствующими начальными и граничными условиями решены методом конечных разностей. Разностные аналоги исходных дифференциальных уравнений решены методом итераций с применением неявной четырехточечной разностной схемы. Система одномерных нелинейных разностных уравнений решена с помощью метода итераций с применением метода прогонки. При решении двухмерной задачи тепломассопереноса переход на новый временной слой реализовывался с помощью двух «дробных шагов» по схеме расщепления.

Решение задачи с оплавлением поверхности проводилось на подвижной сетке, учитывающей продвижение фронта плавления вглубь металла с переменной во времени скоростью. Физически процесс плавления при решении одномерной задачи моделировался только в одной точке разностной сетки по x , соответствующей достижению условий плавления. При проведении численного исследования в первую очередь рассчитывалось температурное поле $T(x)$. Это позволяло по продвижению изотермы, соответствующей температуре плавления, выделить толщину расплавленного слоя Lx .

Для проверки адекватности метода решения использована классическая задача Стефана о движении границы фазового перехода. Было проведено сравнение результатов, полученных аналитическим путем, и с помощью численного моделирования. Анализ результатов показывает, что относительная погрешность вычислений поля температуры и глубины фазового перехода составляет не более 4,4 %.

Достоверность полученных результатов оценивалась также путем так называемых «внутренних проверок» (или тестов). Численные исследования проводились при таких значениях сеточных параметров, дальнейшее уменьшение которых не приводило к заметным (более 0,1 %) изменениям температур. Данный прием, используемый как типичный внутренний тест, хорошо обоснован теоретически и широко применяется при анализе достоверности результатов численных решений задач, для которых нет экспериментальных данных.

В третьей главе представлены результаты анализа основных закономерностей изучаемых процессов, который проведен путем численных исследований с учетом изменения основных значимых параметров лазерной термохимической обработки в диапазонах, соответствующих реальным технологическим режимам. Получено решение задачи в одномерной постановке (1)–(15). Величины теплового потока изменялись в диапазоне $10 \leq q \leq 100 \text{ МВт/м}^2$

На рис. 2 приведено типичное температурное поле, полученное при численном решении задачи теплопереноса в системе «азот - железо» при лазерном нагреве материала с учетом (и без учета) зависимости теплофизических свойств материала от температуры. Как видно из рис. 2, различие в полученных результатах весьма значительно. Например, по температурам поверхности металла (на границе раздела

сред) отклонение результатов составило около 1000 К. Анализ показывает, что отклонения T и в газовой фазе достигают ≈ 500 К в достаточно большой по размерам области. Этот эффект, не имеющий в рассматриваемом случае однокомпонентной газовой среды большого значения, может играть более значимую роль при наличии многокомпонентной (или даже двухкомпонентной) газовой смеси. Повышение температуры влечет за собой увеличение коэффициентов диффузии газов с соответствующей интенсификацией массопереноса. Также можно отметить, что тепловая изоляция газового объема представляется в этом случае целесообразной. Дополнительное (при прочих адекватных условиях) повышение температуры способствует интенсификации

диффузионных процессов и, следовательно, повышению эффективности лазерного легирования металлов.

Представленные на рис. 3 зависимости иллюстрируют основные проблемы, возникающие при выборе параметров обработки элементов тепломеханического оборудования ТЭС.

Хорошо видно, что при относительно низких тепловых потоках интервалы времени между достижением температуры плавления, которая соответствует наиболее благоприятному для легирования состоянию металла, и температурой кипения, соответствующей по сути «аварийному» режиму обработки, составляет несколько секунд. Но с ростом величины q этот интервал быстро уменьшается и при $q=180$ МВт/м² составляет менее 0,5 с. То есть лазерные технологии имеют естественные ограничения по мощностям излучения, которые можно достаточно надежно прогнозировать с использованием

относительно простых моделей. При этом только надо учитывать, что одномерные модели обеспечивают верхние оценки по величинам q . Учет неоднородного характера распространения теплоты в металле в любом случае должен приводить к некоторому снижению значений q .

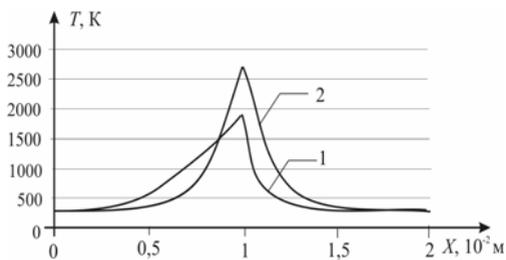


Рис. 2 Распределение температуры по координате x при плотности теплового $q=100$ МВт/м² в момент времени $\tau = 0,15$ с: 1 – учет зависимости теплопроводности и теплоемкости от температуры, 2 – значения λ, C постоянны.

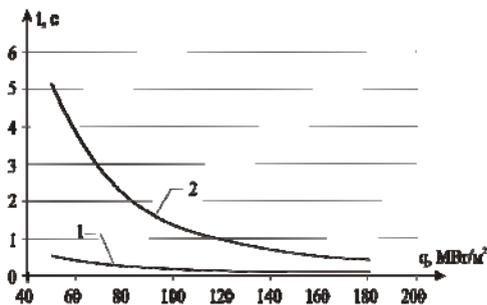


Рис. 3 Зависимости времен достижения температур кипения и плавления от плотности теплового потока: 1 – $T_{пл}$, 2 – $T_{кип}$.

Результаты, представленные на рис. 4 хорошо иллюстрируют еще одну важную особенность лазерных технологий – ограничение по скорости движения луча. Даже при $q=150 \text{ МВт/м}^2$ на поверхности железо прогревается до температур плавления только через $\approx 0,05 \text{ с}$. Соответственно скорость перемещения луча должна в реальных технологиях выбираться из условий достижения определенной глубины проплавления (или прогрева). Очевидно, что эта глубина должна соответствовать толщине легирования (с определенным запасом). Поэтому система факторов «толщина слоя легирования – глубина прогрева – мощность излучения – коэффициент диффузии легирующей компоненты (зависящий от температуры) – время воздействия – ограничения по допустимым температурам поверхности металла» является очень жесткой. Изменение одного фактора влечет за собой неизбежное изменение других. Осуществление эмпирическим путем выбора связей между всеми факторами представляется весьма маловероятным.

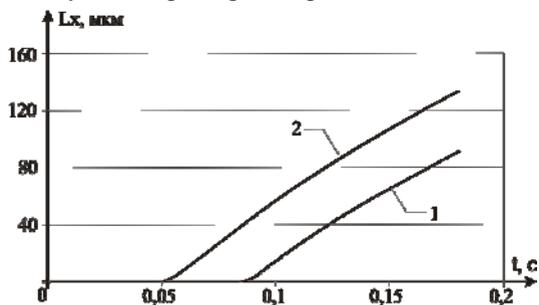


Рис. 4 Зависимость глубины проплавления железа от времени при различных плотностях тепловых потоков: 1 – $q=120 \text{ МВт/м}^2$; 2 – $q=150 \text{ МВт/м}^2$.

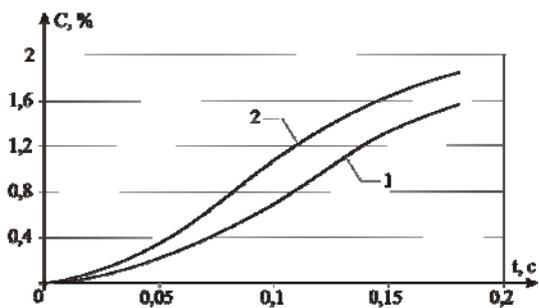


Рис. 5 Изменение концентрации азота в железе с течением времени на глубине 7 мкм при тепловых потоках: 1 – $q=120 \text{ МВт/м}^2$; 2 – $q=150 \text{ МВт/м}^2$.

На рис. 5 приведено изменение концентрации азота с ростом t на глубине 7 мкм в зависимости от плотности теплового потока. При достижении в поверхностном слое обрабатываемого материала высоких концентраций азота наблюдается замедление скорости проникновения атомов газа в металл.

Численные исследования также были проведены для системы «азот-титан».

Установлено, что для достижения $T_{пл}$ мощность излучения, направленная на поверхность титана, необходима ниже, чем в случае с железом. Это можно объяснить более низким коэффициентом температуропроводности титана (в диапазоне температур выше 1000 К). В результате на границе раздела сред наблюдается быстрый рост температуры, но глубина прогрева в этом случае меньше, чем при прогреве железа. Следует

отметить, что на практике обработка металла осуществляется по достаточно большой поверхности. Поэтому для анализа особенностей тепломассопереноса при условиях максимально приближенных к реальным режимам лазерной

термохимической обработки представляется целесообразным рассмотреть двухмерную модель (16)–(30).

Скорость сканирования лазерного луча была выбрана равной 15 мм/с. Значение диаметра луча принималось средним (2 мм) по диапазону возможных значений. В то же время, как показали поверочные расчеты изменение размеров пятна разогрева в реальных пределах, не оказывают значительного влияния на закономерности тепломассопереноса в обрабатываемом слое металла. Важным является достижение наиболее экономически обоснованного для обработки элементов тепломеханического оборудования ТЭС варианта по характерному размеру пятна (максимальная площадь при минимальных затратах).

На рис. 6 и 7 показаны распределения температуры и концентрации азота в прогревом слое железа $C(x,y)$ для двух существенно отличающихся значений q . Хорошо видно, что увеличение вдвое интенсивности теплового воздействия приводит к большему росту концентрации по сравнению с ростом температуры. Выделенный эффект обусловлен экспоненциальной зависимостью значений коэффициента диффузии от температуры. Результаты численного моделирования показывают, что диффузия азота в железо происходит с разной скоростью по всей протяженности прогреваемого слоя железа.

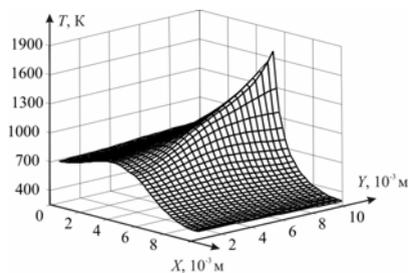
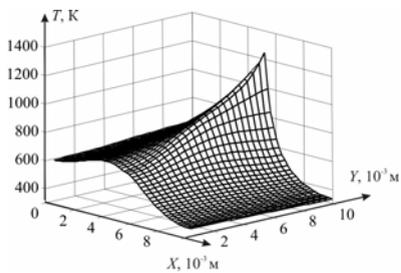


Рис. 6 Распределение $T(x,y)$ в системе «азот-железо» в момент времени $\tau=0,6$ с: а) $q=50$ МВт/м², б) $q=100$ МВт/м².

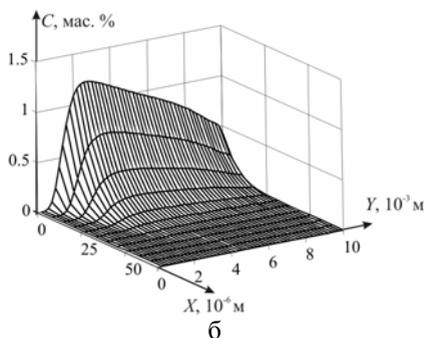
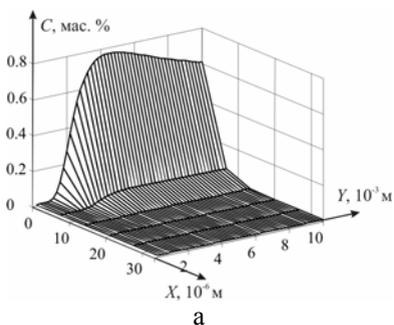


Рис. 7 Распределение концентрации азота $C(x,y)$ в железе в момент времени 0,6 с при тепловом потоке: а) $q=50$ МВт/м², б) $q=100$ МВт/м².

Установлено, что диффузия азота в титан происходит с меньшей интенсивностью, чем в железо. Численные значения концентрации на порядок ниже на одинаковых расстояниях от поверхности нагрева, а увеличение плотности теплового потока не приводит к такому заметному изменению глубины легирования, как в случае железа.

Выделенная особенность обусловлена различием коэффициентов теплопроводности титана и железа. При относительно низких температурах значения λ титана много меньше аналогичных значений λ другого металла. Поэтому прогрев железа осуществляется на большую (по сравнению с титаном) глубину. Соответственно и легирующий газ проникает на существенно большее расстояние вглубь металла. Полученные результаты позволяют сделать важный вывод о том, что лазерные технологии очевидно должны быть более эффективны для металлов и сплавов с высокой теплопроводностью. Это позволяет говорить о возможности обработки, например, алюминиевых сплавов лазерным излучением, что в свою очередь расширит область их применения в теплоэнергетике. Соответственно металлы – плохие (конечно, относительно) проводники тепла являются не лучшими объектами для лазерного термохимического упрочнения.

Особого внимания заслуживает распределение концентрации $C(x,y)$ (как в случае обработки железа, так и в случае обработки титана) в момент достижения лучом лазера правой (рис. 6) границы. Характер распределения функциональной зависимости $C(x,y)$ не является очевидным и обусловлен нестационарностью процесса прогрева металла. Каждый участок поверхности прогревается разное время, и теплосодержания разных участков значительно отличаются друг от друга. Крайние участки области по направлению y являются наименее прогретыми. Соответственно в каждой точке в любой момент времени значения коэффициента диффузии, величина которого определяет скорость проникновения молекул азота в металл, соответствуют температуре в этой точке. В результате и скорость диффузии, и значения концентрации азота зависят от всех трех независимых переменных x , y , t . Можно сделать вывод о том, что рассматриваемый процесс тепломассопереноса является существенно нестационарным и неоднородным, и при разработке технологий лазерного легирования этот фактор необходимо учитывать. Этот вывод может показаться тривиальным если не принимать во внимание то обстоятельство, что в подавляющем большинстве работ по моделированию воздействия лазерного излучения на материалы рассматриваются одномерные модели.

На практике возможны реализации лазерных термохимических технологий при неоднократном прохождении луча по одному и тому же участку обрабатываемой поверхности. Такие варианты представляют особый интерес.

Рассмотрен процесс нагрева и легирования элементов тепломеханического оборудования ТЭС с учетом возвратно-поступательного движения лазерного луча по поверхности (движение от начала оси y в положительном направлении). При достижении противоположной границы системы, лазерный луч выходит за

ее пределы и только после этого начинает возвратное движение. Скорость сканирования лазерного луча была принята равной 20 мм/с.

Значения температуры по всей области решения при возвратном движении (рис. 8, б) выше, т.к. при повторном прохождении луча осуществляется нагрев поверхности с температурой отличной от начальной (300 К). В зависимости от плотности теплового потока температурный перепад варьируется в диапазоне 50...200 К.

Также возвратно-поступательное движение луча приводит к более интенсивному проникновению азота в железо. Например, при $q=150 \text{ МВт/м}^2$ в первом случае максимальное значение концентрации легирующего компонента в приповерхностном слое составляет 0,9 %. Тогда как во втором – концентрация азота достигает 1,2 % (рис. 9).

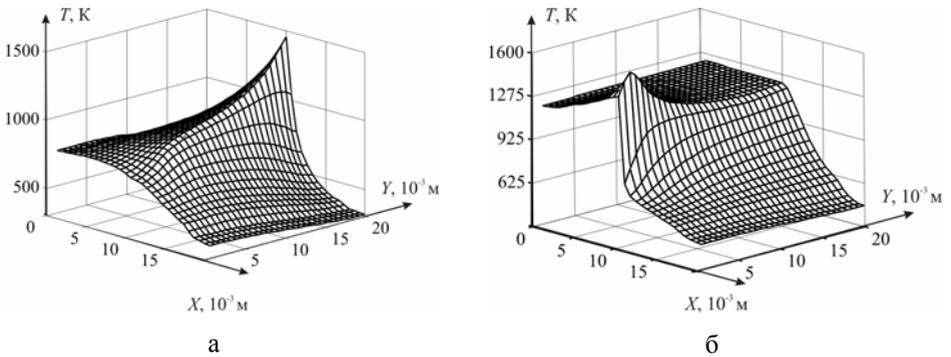


Рис. 8 Распределение $T(x,y)$ в системе «азот-железо» при: а) разовом ($\tau = 1,2$ с) прохождении лазерного луча по поверхности металла, б) двукратном ($\tau = 2,4$ с).

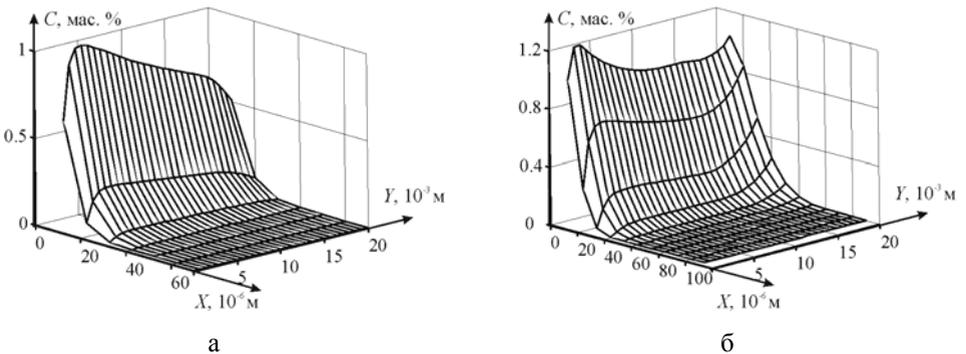


Рис. 9 Распределение концентрации азота $C(x,y)$ в железе при: а) разовом ($\tau = 1,2$ с), б) двукратном ($\tau = 2,4$ с) прохождении лазерного луча по поверхности металла

Такой рост концентрации можно считать достаточно существенным. Но возникает вопрос об эффективности организации процедуры возвратного

движения лазерного луча, т.к. возможно просто снижение скорости сканирования при движении в одном направлении. Такой вариант представляется менее эффективным по следующим причинам. Во-первых, при медленном движении луча больше вероятность перегрева поверхности металла как до температур кипения, так и до условий превышения допустимых максимальных концентраций азота в тонком слое на малых глубинах. Нельзя допустить реализации условий охрупчивания поверхностных слоев. Во-вторых, возвратное движение источника нагрева более благоприятно, чем медленное поступательное одностороннее, потому что в первом случае можно добиться большей глубины легирования. Эта характеристика также является важной при оценке эффективности технологий упрочнения. По крайней мере, оба варианта заслуживают внимания при выборе технологий лазерной обработки.

Характер распределения функциональной зависимости $C(x,y)$ при однократном и двукратном прохождении лазерного луча – различен. В первом случае крайние участки являются наименее прогретыми. При возвратном движении значение концентрации легирующей компоненты меняется. На краях пластины теплосодержание выше. На границе $y=LL$ лазерный луч заканчивает движение и начинает возвращаться, проводя непрерывный нагрев данного участка. Этим можно объяснить рост концентрации азота на границе. Далее лазерный луч проходит по всему образцу повторно, что способствует дальнейшему проникновению атомов азота в металл. Пик температуры на момент времени $\tau=2,4$ с приходится на границу $y=0$ (рис. 9, б).

На рис. 10 приведено распределение концентрации для сечения в средней части пластины ($y=LL/2$). Видно, что при повторном прохождении лазерного луча по поверхности металла профиль концентраций является более пологим. Например, при $x=20$ мкм значение легирующей компоненты в первом случае составляет 0,82 %, а во втором – 0,89 %. Следует отметить, что возвратно-поступательное движение приводит и к увеличению размеров диффузионной зоны в 2 раза. Для кривой 1 толщина диффузионной зоны составляет 60 мкм, а для кривой 2 – около 120 мкм.

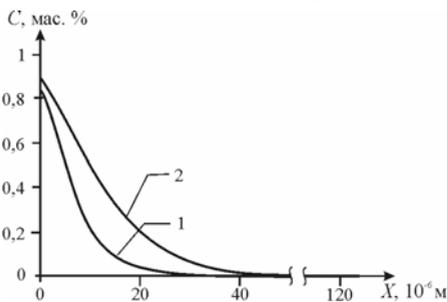


Рис. 10 Распределение концентрации азота по толщине образца при: однократном (а) и двукратном (б) прохождении лазерного луча

При сравнении результатов, полученных при воздействии на поверхность металла тепловым потоком в 100 МВт/м^2 при скорости движения лазерного луча 15 мм/с (рис. 6, б и рис. 8, б) и тепловом потоке в 150 МВт/м^2 (скорость движения 20 мм/с), можно заметить некоторое сходство. Температуры на границе раздела сред находятся в районе 1600 К . И значение

концентрации азота находится на одном уровне – $1,2 \%$ в приповерхностном слое железа. Таким образом, для получения заданного значения концентрации

легирующей компоненты в приповерхностном слое возможно варьирование параметрами технологии обработки. В ходе численных вычислений, было выявлено, что изменение геометрических размеров системы «газ-металл» при одних и тех же значениях технологических параметров не приводит к заметному увеличению или уменьшению концентрации легирующей компоненты в приповерхностном слое металла.

Подводя итог выполненным исследованиям можно отметить следующее. Полученные результаты позволяют сделать выводы о возможных перспективах использования лазерных технологий упрочнения элементов тепломеханического оборудования ТЭС. Прежде всего, необходимо отметить, что эти технологии являются в наибольшей степени из многих известных наукоемкими. Без предварительного достаточно масштабного численного моделирования практически невозможно выбрать оптимальные или даже наиболее перспективные технологические режимы. С одной стороны, в слое легирования должна быть достигнута желаемая концентрация легирующей компоненты в реальных условиях. Но, с другой стороны, градиент этой концентрации в приповерхностном слое во многих случаях может быть очень высок. Соответственно, требуется оценка допустимого уровня перепадов концентраций легирующих компонентов, при котором реализуется задача упрочнения материала. Нецелесообразно и повышение величины C выше оптимального уровня – возможно охрупчивание приповерхностного слоя. Поэтому выбор времени воздействия лазерного луча и мощности излучения должен проводиться с очень высокой точностью, достижение которой опытным путем невозможно.

Следует также подчеркнуть еще раз, что теоретические исследования на примере «железо – азот» выполнены в первую очередь потому, что для этой системы известны с достаточно высокой степенью полноты коэффициенты диффузии. Кроме того, система «железо – азот» является базовой для анализа аналогичных процессов в различных сочетаниях «сталь – азот» применительно к элементам тепломеханического оборудования ТЭС. Но при постановке задачи не было принято каких-либо ограничений по физической модели процесса тепломассопереноса в приповерхностном слое металла, которые бы исключали или ограничивали переход на численное исследование других сочетаний «металл – газ» в реальном диапазоне изменения температур. Поэтому можно сделать обоснованное заключение о возможности применения разработанной модели и методики численного анализа для любых сочетаний «конструкционный металл – легирующий газ» элементов тепломеханического оборудования тепловых электрических станций.

Полученные результаты дают возможность не только достаточно объективного моделирования процессов тепло- и массопереноса при лазерной обработке, но и возможность выбора наиболее благоприятных для легирования технологических параметров. Экспериментальный подбор технологических параметров лазерной обработки с многочисленным перебором условий легирования – достаточно трудоемкий и энергоемкий процесс применительно к

элементам тепломеханического оборудования ТЭС. Математическое моделирование процессов теплопереноса и диффузии в рамках представленной в диссертации модели может быть проведено для сотен вариантов. Проведение численных исследований возможно с учетом варьирования многих параметров (геометрических размеров системы, теплофизических параметров материалов, мощности излучения, условий теплообмена с окружающей средой).

Рассматривая варианты практического применения полученных при выполнении диссертации результатов для моделирования процесса упрочнения элементов тепломеханического оборудования ТЭС можно остановиться на таком очевидном примере как лопатки турбин. Также наиболее уязвимыми являются участки трубопроводов и паропроводов на поворотах (изгибах). Эрозионный износ на этих участках в 3 – 4 раза выше, чем на прямолинейных. Поэтому лазерное термохимическое упрочнение рабочей поверхности паропровода на относительно коротком участке поворота в несколько десятков миллиметров может привести к повышению эрозионной стойкости и соответственно длительности эксплуатации этого важнейшего конструктивного элемента оборудования ТЭС в несколько раз. Аналогичный эффект может быть достигнут и при локальном упрочнении деталей оборудования для подготовки топлива.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В настоящей работе впервые проведено математическое моделирование тепломассопереноса в приповерхностном слое металла при лазерной обработке.

Основные результаты и выводы диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Решена одномерная нестационарная задача тепломассопереноса при лазерном упрочнении металла в системе «газовая среда-металл».
2. Решена двухмерная нестационарная нелинейная задача тепломассопереноса при нагреве поверхности металла движущимся лазерным лучом.
3. Результаты, полученные при решении двухмерной модели тепломассопереноса, позволяют сделать вывод о существенно нестационарном и неоднородном переносе тепла и массы. При решении одномерной задачи невозможно точно описать распределение концентрации легирующей компоненты в приповерхностном слое металла.
4. Решена двухмерная нестационарная нелинейная задача тепломассопереноса при нагреве поверхности металла при обработке лазерным лучом с учетом повторного цикла нагрева.
5. Выявлено, что повторный цикл обработки металла лазерным лучом приводит к увеличению толщины упрочняемого слоя почти в 2 раза. Также это приводит к уменьшению градиента концентрации легирующей компоненты в приповерхностном слое металла.
6. Предложенная двухмерная модель процесса тепломассопереноса в приповерхностном слое металла при лазерной обработке может быть применима для различных конструкционных металлов и газовых сред, в

которых происходит обработка элементов тепломеханического оборудования ТЭС.

7. Предложенная модель позволяет подобрать такие технологические режимы лазерной обработки, при которых возможно получение определенной глубины легирования с необходимыми значениями концентраций легирующей компоненты в приповерхностном слое элементов.
8. Результаты проведенных исследований создают предпосылки для их использования на практике при лазерной обработке элементов тепломеханического оборудования тепловых электрических станций (паропроводов, корпусов и лопаток паровых и газовых турбин, водяных экономайзеров, пароперегревателей, основных агрегатов систем подготовки топлива и др.), которая позволит повысить надежность и рабочий ресурс отдельных агрегатов, систем и тепловых электростанций в целом.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кузнецов Г.В., Нагорнова Т.А. Численное моделирование процесса лазерной термохимической обработки металлов // Материалы докладов девятой всероссийской научно-технической конференции. «Энергетика: Экология, Надежность, Безопасность». – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – Т. 1. – С. 209–210.
2. Кузнецов Г.В., Нагорнова Т.А. Тепломассоперенос при воздействии лазерного излучения на материалы // Материалы докладов десятой всероссийской научно-технической конференции. «Энергетика: Экология, Надежность, Безопасность». – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – Т. 1. – С. 178–179.
3. Нагорнова Т.А. Численный анализ процесса обработки металлов лазерным излучением // Тезисы докладов десятой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» –М.: МЭИ, 2004. – Т. 3. – С. 13–14.
4. Кузнецов Г.В., Нагорнова Т.А. Диффузия и теплопередача в расплаве металла при лазерном термохимическом упрочнении // Материалы Международной конференции «Сопряженные задачи механики, информатики и экологии» –Томск: Изд-во Томского университета, 2004. – С. 138–139.
5. Кузнецов Г.В., Нагорнова Т.А. Тепломассоперенос в слое расплава металла при лазерном термохимическом упрочнении. Тезисы докладов XXVII Сибирского теплофизического семинара, посвященного 90-летию академика С.С. Кутателадзе –Новосибирск, 2004. – С. 211–213.
6. Нагорнова Т.А. Лазерная термохимическая обработка металлов // Тезисы докладов одиннадцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» – М.: МЭИ, 2005. – Т. 3. – С. 57–58.

7. Нагорнова Т.А. Математическое моделирование процесса промерзания насыщенного влагой грунта // Известия Томского политехнического университета. – Томск: Изд-во ТПУ. – Т. 308. – № 6. – 2005. – С. 127–129.
8. Nagornova T. A. Numerical analysis of the process of freezing water layer. Modern techniques and technologies // XI International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists. March 29-April 2, 2005. – Tomsk. – Russia. – p. 194–196.
9. Нагорнова Т.А. Математическое моделирование теплофизических процессов при лазерном легировании металлов // Сборник материалов II Международной научно-технической конференции «Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании» – Тюмень: ТюмГНГУ, 2006. – С. 137–140.
10. Кузнецов Г.В., Нагорнова Т.А. Диффузия и теплопередача в приповерхностном слое металла при лазерном азотировании. ТПУ. Томск, 2006. – 11с. – Деп. в ВИНТИ 29.05.06, № 711–В2006.
11. Кузнецов Г.В., Нагорнова Т.А. Математическое моделирование тепловых и диффузионных процессов при лазерной обработке металлов // ТПУ. – Томск, 2006. – 11 с. – Деп. в ВИНТИ 29.05.06, № 716–В2006.
12. Кузнецов Г.В., Нагорнова Т.А. Математическое моделирование процессов нагрева, плавления и диффузии легирующей компоненты в металл при лазерном термохимическом упрочнении // Физика и химия обработки материалов. – 2006. – № 3. – С. 33–37.
13. Нагорнова Т.А. Процессы тепло- и массопереноса при воздействии подвижного лазерного излучения на поверхность металла // Труды XII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» – Томск: Изд-во ТПУ, 2006 – Т. 2. 392–394.
14. Кузнецов Г. В., Нагорнова Т.А. Численный анализ процесса тепломассопереноса в системе «газ - металл» при перемещении лазерного луча по поверхности легируемого металла // Труды IV Российской национальной конференции по теплообмену: В 8 томах. Т. 7. Радиационный и сложный теплообмен. Теплопроводность, теплоизоляция. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – С. 252–255.

