

На правах рукописи

Костенков Сергей Николаевич

**ЗАТУХАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ВЫСОКОДИСПЕРСНЫМИ
ПОРОШКОВЫМИ СРЕДАМИ**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Ижевск - 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Удмуртский государственный университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Харанжевский Евгений Викторович

Официальные оппоненты: **Степанов Андрей Львович**
доктор физико-математических наук
ФГБУН КФТИ КазНЦ РАН, г. Казань,
ведущий научный сотрудник

Васильев Леонид Сергеевич
доктор физико-математических наук
ФГБУН ФТИ УрО РАН, г. Ижевск
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: ФГБУН Институт электрофизики УрО РАН,
г. Екатеринбург

Защита состоится «15» мая 2015 г. в 14:30 ч на заседании диссертационного совета Д 004.025.01 при Физико-техническом институте УрО РАН по адресу 426000, г. Ижевск, ул. Кирова, 132. тел: (3412)43-03-02, факс: (3412) 25-05-14

С диссертации можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Физико-технического института УрО РАН: <http://ftiudm.ru/>.

Автореферат разослан «__»_____2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Добышева Л.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время проводятся интенсивные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию новых и совершенствованию развитых ранее технологических методик для производства объемных единичных деталей с усложненной геометрией, сложных по химическому составу и с уникальными физическими свойствами. Ввиду необходимости изготовления функциональных готовых деталей, развивается технология быстрого прототипирования, методы послойного лазерного синтеза объемных изделий.

Среди методик послойного синтеза наиболее известными являются метод селективного лазерного спекания и метод селективного лазерного плавления. Данные методы позволяют создавать готовые детали, отличающиеся повышенной прочностью и большими функциональными возможностями в различных сферах человеческой деятельности с применением перспективных порошковых композиций, опираясь на жидкофазное спекание при лазерном воздействии.

В работах разных авторов анализируется физическая картина селективного лазерного спекания/плавления порошков, а также разрабатывается согласованная теоретическая модель обработки порошков излучением, с длиной волны в разных диапазонах.

На качество изготовления деталей из металлов и сплавов, методами селективного лазерного спекания/плавления, влияет большое число факторов. К ним относятся энергетические параметры лазерного излучения, физические свойства порошка, дисперсионные свойства порошка. Сложность протекающих физико-химических процессов при лазерном воздействии на порошки требует развития средств контроля и автоматизации процессов селективного лазерного спекания/плавления, а также приводит к существенным трудностям, связанным с выбором оптимальных параметров процесса. В связи с этим, большое внимание уделяется компьютерному моделированию распространения лазерного излучения и моделированию тепломассопереноса при лазерной обработке порошковой

среды. В существующих моделях теплопереноса при лазерной обработке порошка, среда определяется как квазиоднородная с учетом действия лазерного излучения, как потока энергии на поверхность порошковой среды. Однако это не совсем точный подход, согласно экспериментальным работам лазерное излучение проникает вглубь порошковой среды за счет существующих пор и пустот. Учитывая проникновение лазерного излучения вглубь порошка, возникает необходимость обоснования выбора вида объемного источника лазерной энергии, рассматривая процессы отражения поглощения и рассеяния лазерного излучения в порошковых средах.

По тематике диссертационной работы проводились исследования Шишковским И. В. в самарском филиале физического института им. П. Н. Лебедева РАН, Гусаровым А. В. в институте металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, Крут и Рамбоутс в Левенском университете Бельгии, Дзюба В. П. в дальневосточном отделении РАН.

Целью работы является экспериментальное исследование и компьютерное моделирование процесса распространения и поглощения лазерного излучения в металлических порошковых и высокодисперсных композитных системах.

В рамках указанной цели решались следующие **задачи**:

1) исследование характеристик рассеянного лазерного излучения при его прохождении через высокодисперсные металлические порошковые среды и характера затухания интенсивности излучения в порошковых средах;

2) разработка и компьютерная реализация математической модели, основанной на системе уравнений Максвелла, с учетом характера взаимодействия лазерного излучения с поверхностью металлов, описывающей физические явления дифракции лазерного излучения в высокодисперсных системах вакуум - полидисперсные частицы, отражения и поглощения энергии излучения поверхностью металлических и непрозрачных диэлектрических частиц;

3) теоретическое исследование зависимости проникающей способности лазерного излучения от дисперсионного состава порошка, плотности насыпки и химического состава с использованием модели, основанной на численном решении уравнений Максвелла;

4) обоснование объемного источника энергии от лазерного излучения для модели теплопереноса при лазерном облучении дисперсных порошковых сред, и характера его изменения в процессе лазерной обработки при селективном лазерном спекании.

Научная новизна работы заключается в следующем:

– впервые экспериментально продемонстрировано, что проникновение излучения через высокодисперсный порошковый слой может быть описано экспоненциальной зависимостью, наибольшая часть рассеянной мощности заключена внутри области, ограниченной малыми углами;

– получено выражение граничного условия для описания взаимодействия деполяризованного лазерного излучения с поверхностью металлических частиц;

– предложена математическая модель распространения энергии лазерного излучения, основанная на решении уравнения Гельмгольца, применение которого обосновано уравнениями классической электродинамики сплошных сред;

– показано, что модель пространственного распределения и распространения лазерного излучения в дисперсионной среде с металлическими частицами должна принимать во внимание волновую природу распространяющегося излучения, в том случае, когда длина волны сопоставима со средним размером полидисперсных частиц;

– впервые установлена математическая зависимость для коэффициента затухания лазерного излучения в высокодисперсной среде от длины волны, коэффициента отражения, диаметра частиц и плотности насыпки;

– обосновано выражение для объемного источника энергии и установлено, что коэффициент затухания лазерного излучения в высокодисперсных порошках определяет глубину зоны спекания.

Научно-практическая значимость работы. В процессе работы над темой диссертации разработан метод и математическая модель определения характеристик распространения лазерного излучения в порошковых средах. Разработанный метод позволяет измерять интенсивность рассеянного лазерного излучения в зависимости от угла рассеяния и толщины слоя. Установленные математические зависимости для коэффициента затухания лазерного излучения могут быть использованы в прямом математическом моделировании, в оценочных эмпирических моделях и применимы на практике для корректного задания теплофизических параметров в пористых порошковых средах при их лазерной обработке. Практическая ценность модели заключается в возможности оптимизации характеристик лазерного излучения для получения заданных механических, физико-химических свойств.

Положения, выносимые на защиту:

- экспериментальный метод позволяет измерять интенсивность рассеянного лазерного излучения в зависимости от толщины порошкового слоя и угла рассеяния;
- распределение интенсивности лазерного излучения по глубине порошкового слоя определяется экспоненциальной зависимостью, при этом наибольшая часть рассеянной мощности заключена внутри области, ограниченной малыми углами, поглощение определяется морфологией и дисперсностью частиц;
- математическая модель, основанная на решении уравнения Гельмгольца, применение которого обосновано уравнениями классической электродинамики сплошных сред, позволяет адекватно моделировать распространение лазерного излучения в порошковых средах;
- на пространственное распределения объемной плотности энергии и распространение лазерного излучения в дисперсионной среде с частицами, сопоставимыми по размеру с длиной волны, значительное влияние оказывают процессы волновой природы;

– коэффициент затухания лазерного излучения зависит от длины волны, коэффициента отражения, диаметра частиц и плотности насыпки дисперсного порошка из непрозрачных диэлектрических и металлических частиц;

– глубина зоны спекания обратно пропорциональна коэффициенту затухания лазерного излучения в высокодисперсных порошковых средах.

Соответствие специальности. Тема исследований соответствует пункту 2 паспорта специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Апробация работы. Все основные результаты и выводы, изложенные в диссертации, представлены в виде публикаций, положения и материалы диссертационной работы обсуждались и докладывались на семинарах и научных конференциях: IX Всероссийская конференция «Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем» (Ижевск, ноябрь 2010 г.), четвертая Международная конференция «От наноструктур, наноматериалов и нанотехнологий к nanoиндустрии» (Ижевск, апрель 2013 г.), European congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes, Euromat 2013. (Sevilla, Spain, September 2013 г.), V Всероссийская конференция по наноматериалам «НАНО 2013» (Звенигород, сентябрь 2013 г.).

Публикации. Материалы диссертационной работы полностью отражены в научных публикациях. По результатам выполненных исследований опубликовано семь полнотекстовых статей, в том числе три статьи в журналах из списка, рекомендованного ВАК РФ. Из них две статьи входят в индекс цитирования Web of Science. Опубликованы тезисы/доклады четырех Международных и Всероссийских конференций. Полный список публикаций по теме диссертации представлен в одиннадцати научных работах.

Личный вклад автора. Диссертация является самостоятельной работой. Результаты, изложенные в диссертации, получены лично автором или при его непосредственном участии в соавторстве. Вклад автора состоит в проведении экспериментальных и теоретических исследований и анализе полученных результатов. Постановка цели и задач исследований, определение методов их решения и интерпретация результатов работы были выполнены совместно с научным руководителем. Вклад диссертанта в работу является определяющим.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав с кратким выводом по каждой главе, заключения, списка цитируемой литературы и приложения. Содержание работы изложено на 160 страницах машинописного текста, включающих 58 рисунков, 7 таблиц и библиографию из 173 наименования.

Основное содержание работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения.

Во введении рассматривается актуальность тематики, формулируются и обосновываются цели и задачи работы, излагаются основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость работы, приводится общая структура работы.

Первая глава является обзором литературных данных, имеющихся по тематике работы в настоящее время, она состоит из восьми частей. Описаны основные методы быстрого прототипирования, селективное лазерное спекание/плавление, использующие дисперсные порошки, существующие на сегодняшний день недостатки этих методов. Приведены данные по материалам для получения исходных порошковых сред. Рассмотрены теплофизические основы, реология и микрокинетика процессов селективного лазерного спекания/плавления. Показано, что на качество получаемых спекаемых изделий влияют такие параметры как мощность лазера, материал порошка, схема сканирования лазерным лучом, дисперсность порошка и указано на методы контроля и оптимизации режимов лазерного воздействия. Рассмотрены взаимодействие лазерного излучения с поверхностью металлических материалов и метод измерения энерговыделения в слое порошка при воздействии лазера. Описаны методы математического моделирования теплопереноса при лазерной обработке порошковых материалов. Описана модель распространения лазерного излучения в приближении гомогенной поглощающей-рассеивающей среды. Модель, основанная на приближении геометрической оптики, рассматривает прямолинейное распространение лазерного излучения через систему пор и пустот в по-

рошковом слое. Данное приближение не учитывает явления дифракции и отражения света от поверхности частиц. Приводится аналитическое приближение Ми рассеяния света однородными сферическими частицами, которое может использоваться для анализа транспорта электромагнитного излучения. Рассмотренные модели распространения лазерного излучения в среде имеют недостатки. Модель рассеяния излучения на полидисперсных частицах, с точки зрения волновой теории дифракции Ми, применима только в сильно разбавленных средах, когда частицы не контактируют друг с другом. Модель, предложенная в работах Гусарова, хорошо применима для случаев, когда размер частиц значительно превосходит длину волны лазерного излучения, так как эта модель использует параметры в уравнении распространения излучения, полученные на основе геометрической оптики.

По итогам аналитического обзора литературы сформулирована цель исследования.

Во второй главе представлен экспериментальный метод определения интенсивности рассеянного лазерного излучения в порошковых средах и приведены результаты серии экспериментов по определению рассеянной и поглощенной мощности лазерного излучения в порошковых средах. Она состоит из двух разделов.

В первом разделе приведен анализ процессов распространения лазерного излучения в дисперсных гетерогенных порошковых средах. На распределение и поглощение лазерного излучения в порошковой среде влияют несколько факторов. Во-первых, лазерное излучение проникает в порошок по системе открытых пор и пустот, доставляя энергию в его объем. Во-вторых, при распределении лазерного излучения происходит дифракция на частицах порошковой среды. На распределение лазерного излучения в порошковой среде влияет материал частиц, в частности для металлических частиц имеет место сильное отражение и быстрое затухание в тонком поверхностном слое. Так же необходимо учитывать эффекты дальнего поля, обусловленные интерференцией когерентных волн рассеянных частицами. Поток энергии падающего излучения равен

сумме поглощенного и рассеянного излучения, а диффузно отраженная часть порошковой средой в целом меньше, чем отраженная от сплошной поверхности. В однородной рассеивающей-поглощающей среде возникает зависимое рассеяние, обусловленное влиянием соседних областей.

Во втором разделе представлен разработанный экспериментальный метод определения рассеянной и поглощенной мощности лазерного излучения в высокодисперсном порошковом слое по его глубине. Суть метода заключается в точной регистрации интенсивности рассеянного в нижней полусфере, в пределах телесного угла 2π , лазерного излучения порошковым слоем заданной толщины. Измерение интенсивности в верхней полусфере позволяет вычислить диффузно отраженную мощность лазерного излучения порошковой средой. Зная фактическую мощность лазерного излучения и мощность рассеянной лучистой энергии, определяется поглощенная объемом порошка энергия. Метод определения рассеянной и поглощенной мощности лазерного излучения включает в себя три этапа.

На первом этапе эксперимента, с целью точного определения выходной мощности лазера, было проведено измерение мощности в зависимости от частоты генерации и мощности накачки лазера методом калориметрирования модели черного тела. Результаты эксперимента по калориметрированию и их анализ показывает, что фактическая мощность, поглощаемая черным телом при минимально возможной мощности накачки, составляет $P_L = (0.140 \pm 0.013)$ Вт и отличается от ожидаемого значения, задаваемого по техническим параметрам лазера. Экспериментально была определена фактическая мощность для других значений мощности накачки лазера. Исследования показали, что в меньшей степени средняя мощность P_L зависит от частоты ν генерации импульсов.

На втором этапе проводилась тарировка фотодатчика Si-Photo для определения максимальной интенсивности лазерного луча и распределения излучения по сечению луча. Определяя распределение интенсивности по сечению лазерного луча, на фотодатчик располагали оптическую щель, размеры которой

меньше размеров рабочей области фотодатчика, и перемещая его микрометрическим винтом с шагом 0.05 мм перпендикулярно к направлению распространения излучения, локально измеряли интенсивность по сечению лазерного луча. Тарировка фотодатчика позволила определить коэффициент k перевода фототока в интенсивность лазерного излучения. Сила тока J фотодатчика связана со средней мощностью P_L лазерного излучения уравнением

$$J = 2kb \left(\frac{P_L}{\int_0^{d/2} e^{-ar^2} 2\pi r dr} \right) \cdot \int_0^{d/2} e^{-\alpha(x^2+y^2)} dx, \text{ где } b \text{ – ширина щели фотодатчика равна } 0.2$$

мм, d – диаметр луча лазера в зоне действия на порошок равен 1 мм, $\alpha = 2.95 \cdot 10^6$ (1/м²) – коэффициент определяется из экспериментальных данных по тарировке, в показателе гауссовой экспоненты, r – расстояние от центра луча до малой области фотодатчика с координатами x и y . Из уравнения для J , измеряя фототок, определили коэффициент преобразования фототока в мощность $k = 6.29 \cdot 10^6$ А/Вт.

На третьем этапе проводилось исследование поглощения и рассеяния лазерного излучения объемом высокодисперсного порошкового слоя различной толщины. Для проведения эксперимента были подготовлены порошки: 1) алюминия; 2) карбонильного железа; 3) нанокompозитный высокодисперсный порошок системы Fe-10%Ni.

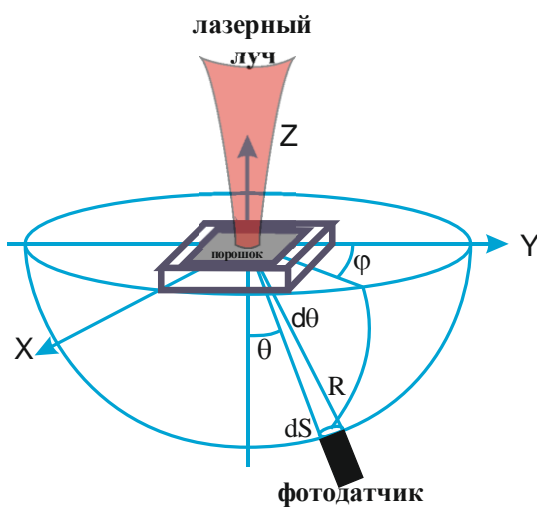


Рис. 1. Принципиальная схема метода измерения.

Для этого использовался иттербиевый оптоволоконный лазер, работающий в импульсном режиме генерации излучения, управляемый персональным компьютером. Параметры лазера: длина волны 1.065 мкм; частота генера-

Принципиальная схема метода измерения (рис.1) заключается в регистрации рассеянной мощности лазерного излучения в зависимости от угла рассеяния и толщины порошкового слоя. Для этого использовался иттербиевый оптоволоконный лазер, работа-

ющий в импульсном режиме генерации излучения, управляемый персональным компьютером. Параметры лазера: длина волны 1.065 мкм; частота генера-

ции 40 кГц; длительность импульса порядка 100 нс. Регистрация рассеянного излучения осуществлялась фотодатчиком Si-Photo со спектральным диапазоном до 1150 нм, при его повороте по сфере радиусом $R=6$ см с шагом 0.5° на угол θ . Форма и толщина высокодисперсной порошковой среды формировалась с применением маски из алюминиевой фольги на плоскопараллельной кварцевой пластинке.

Вследствие того, что излучение оптоволоконного лазера деполяризовано, а так же процесс рассеяния порошковой средой носит случайный характер, показания фотодатчика мало зависят от угла φ . Тогда, получая экспериментальную зависимость силы тока от угла рассеяния $J(\theta)$, можно вычислить мощность P рассеянного слоем потока лазерного излучения по уравнению

$$P = \frac{2\pi R^2}{k \cdot \chi \cdot \Delta S} \int_0^\pi J(\theta) \sin \theta d\theta, \text{ где } R - \text{ радиус полусферы перемещения датчика, } \Delta S -$$

площадь входного окна фотодатчика. Для уменьшения интенсивности лазерного излучения использовался светофильтр, коэффициент пропускания χ которого определялся с помощью спектрофотометра СФ – 26 методом эталона на длине волны 1 мкм.

Проводя измерения для нескольких слоев разной толщины, установлено, что проходящее лазерное излучение соответствует экспоненциальной зависимости вида $P = P_L \exp(-\gamma h)$, из которого можно определить коэффициент γ затухания лазерного излучения высокодисперсным порошковым слоем. Для нанокompозитного высокодисперсного порошка системы Fe-10%Ni коэффициент затухания равен $\gamma=0.11 \text{ мкм}^{-1}$. Проводя многочисленные эксперименты для порошковых слоев различной толщины и из разных материалов (Fe, Al), при многократных измерениях получены результаты для функций $J(\theta)$. Вычисляя мощность рассеянного излучения, аналогично определялись коэффициенты затухания лазерного излучения для порошков Fe и Al. Характеристики применяемых порошков и результаты эксперимента представлены в таблице.

Таблица. Характеристики применяемых в эксперименте порошковых сред.

Порошок	Размер частиц d , мкм	Насыпная плотность ρ , кг/м ³	Толщина слоев h , мкм	Эксперимент γ , мкм ⁻¹	Моделирование γ , мкм ⁻¹	
					3D	2D
Fe	3	2996	10-30	0.157	0.2	0.36
Al	10	1400	30-150	0.036	–	0.047
Fe-10%Ni	3,2	2100	10-90	0.110	0.155	0.187

Используя статистические методы расчета погрешностей косвенных измерений, установлено, что точность метода составляет порядка 5% – 9%.

Таким образом, методом измерения интенсивности рассеянного лазерного излучения показано, что прохождение излучения через высокодисперсный металлический слой порошка может быть описано экспоненциальной закономерностью, при этом наибольшая часть рассеянной мощности заключается внутри области, ограниченной достаточно узким углом дифракции.

Третья глава посвящена разработке метода численного моделирования, 2D и 3D компьютерному моделированию распространения лазерного излучения в дисперсных средах и анализу результатов компьютерного моделирования для порошковых сред с диэлектрическими и металлическими частицами. Она состоит из четырех разделов.

В первом разделе приведен анализ применимости уравнений классической электродинамики сплошных сред для моделирования транспорта энергии лазерного излучения. Распространение электромагнитных волн лазерного излучения в среде основано на предположении о линейной зависимости вектора электрического смещения от напряженности поля. Это справедливо с достаточной точностью, если напряженность распространяющихся электромагнитных волн лазерного излучения E мала по сравнению со значениями, характерными для внутриатомных полей E_{at} для атомов исследуемой порошковой среды. Результаты аналитических расчетов показывают, что напряженность электрического поля в потоке лазерного излучения не превышает напряженности электрического поля внутри атома для наших экспериментов.

Во втором разделе обосновываются уравнения модели, выбор граничных условий, геометрия вычислительной области, метод и среда численного моделирования. Распространение излучения в среде описывается в рамках положений электродинамики, на основе уравнений Максвелла. Решение системы уравнений Максвелла приводит к выражению $\nabla^2 \vec{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \text{grad } \rho_e$, где \vec{E} – вектор напряженности электрического поля в электромагнитной волне, μ , ϵ – магнитная и электрическая проницаемости среды, σ – проводимость среды, ρ_e – объемная плотность свободных носителей заряда. В случае проводящих металлических сред коэффициенты μ и ϵ можно представить в комплексном виде, что, соответственно, приводит к комплексному показателю преломления среды. В металлических средах объемная плотность заряда равна нулю, поэтому можно записать уравнение, которое является волновым в виде $\nabla^2 \vec{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0$. Его решением является волновая функция в виде $\vec{E}(r, t) = \vec{E}_0 \exp[-\beta r] \cdot \exp[-i(\omega t - kr)]$. При этом затухание электромагнитной волны в металле определяется членом с первой производной по времени. Учитывая малые размеры области, заполненной порошком, и высокую скорость распространения лазерного излучения, транспорт энергии после включения импульса лазера быстро приходит к состоянию, характеризующемуся стационарным распределением объемной плотности лучистой энергии. Тогда решение волнового уравнения можно представить в виде произведения временной и координатной частей, $\vec{E} = \vec{U} \cdot \exp[-i\omega t]$, где \vec{U} – координатная часть, не зависящая от времени. Таким образом, временное уравнение можно преобразовать к уравнению для сплошных сред вида: $\nabla^2 \vec{U} + k^2 \vec{U} = 0$, где \vec{U} – координатная часть общего решения телеграфного уравнения. Такое преобразование значительно сокращает требуемые вычислительные ресурсы.

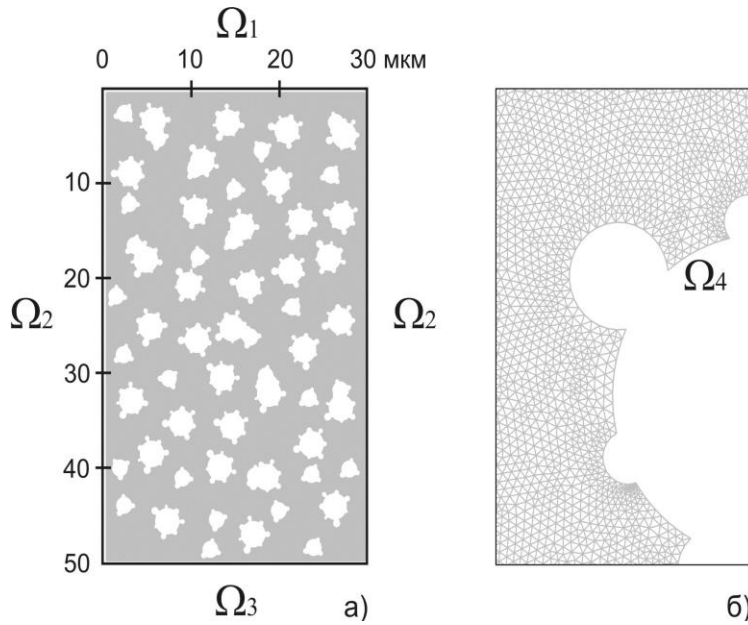


Рис.2. Расчетная область:
а) геометрия и граничные условия;
б) вид расчетной сетки вблизи поверхности
металлической частицы для Fe-Ni.

Представлены выражения граничных условий: для источника излучения с единичной амплитудой на облучаемой лазером границе порошковой области Ω_1 – $\vec{n} \cdot \vec{\nabla} U + ikU = 2ik$; для абсолютного поглощения излучения при $R=0$, Ω_3 – $\vec{n} \cdot \vec{\nabla} U + ikU = 0$; и для зеркального отражения излучения с коэффициентом $R=1$, Ω_2 – $\vec{n} \cdot \vec{\nabla} U = 0$. Геометрия расчетной области (рис.2) для композитного порошка задавалась размерами 60×50 мкм и 30×50 мкм, частицы при случайном распределении расположены в некотором удалении друг от друга. Расчетная сетка составлена из элементов треугольной формы, шаг вычислительной сетки $0,1$ мкм, в расчетной области содержится около 10^6 элементов сетки. Численная модель была реализована в коммерческом вычислительном пакете Comsol MultiPhysics 3.5a, предназначенном для решения физических и инженерных задач. Стационарное уравнение модели для поставленной задачи было реализовано методом конечных элементов средствами Comsol.

В третьем разделе рассматривается 3D моделирование, которое выполнено только для порошковых сред, исследованных экспериментально (см. таблицу) с целью сравнения результатов моделирования с экспериментом.

Получены и обоснованы условия на границе Ω_4 раздела вакуум-порошковая среда:

$$\vec{n} \cdot \vec{\nabla} U + ikU = \frac{2ik\sqrt{R}U e^{-i\pi}}{1 + \sqrt{R}e^{-i\pi}} \quad \text{— для}$$

непрозрачных диэлектриков, а для порошковой среды с металлическими частицами в виде

$$\vec{n} \cdot \vec{\nabla} U + ikU = \frac{2ik\sqrt{R}U e^{-i\pi/2}}{1 + \sqrt{R}e^{-i\pi/2}}.$$

В четвертом разделе представлены результаты 2D компьютерного моделирования транспорта энергии лазерного излучения с разными длинами волн для модельных порошковых сред, параметры которых соответствуют физическому эксперименту.

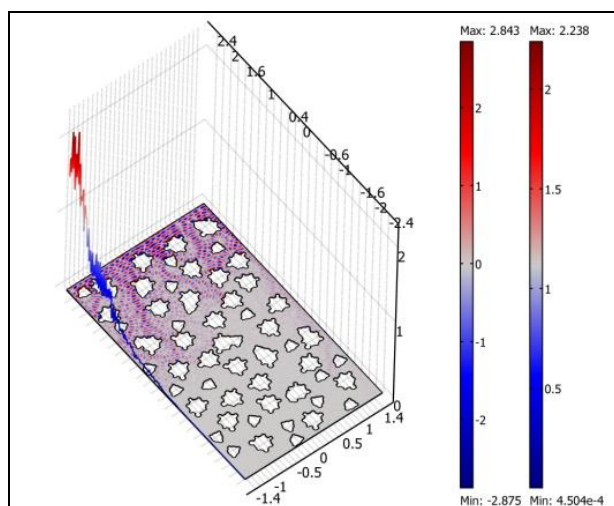


Рис.3. Результаты моделирования распространения лазерного излучения в порошковой среде Fe-10%Ni. На плоскости приведено распределение амплитуды волны (левая шкала), по вертикали приведено усредненное по ширине расчетной области значение интенсивности электромагнитной волны (правая шкала) для композитного порошка.

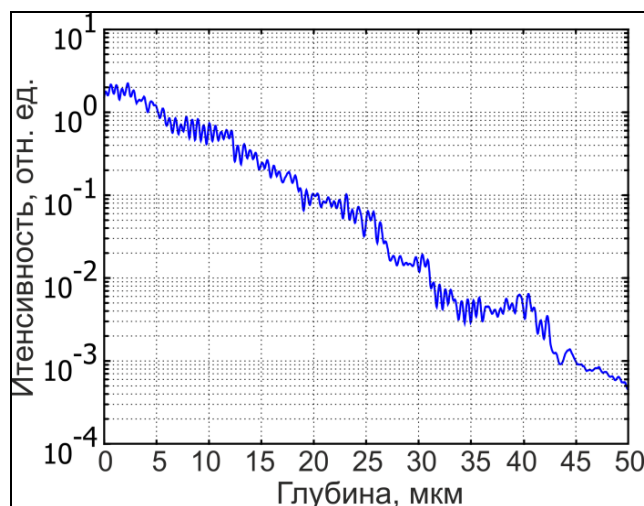


Рис.4. Зависимость интенсивности электромагнитной волны от глубины проникновения в порошковый слой из композитного материала Fe-10%Ni. Интенсивность усреднялась по ширине расчетной области.

Моделирование в порошковых средах, состоящих из одинаковых частиц или гибридных элементов из частиц разного диаметра, задаваемых в 2D пространстве бесконечными параллельными цилиндрами, выполнялось для определения коэффициента затухания γ излучения в зависимости от длины волны λ , коэффициента отражения R , диаметра частиц d и плотности насыпки ρ . На рис. 4 показан экспоненциальный характер затухания интенсивности излучения в порошковом слое из композитного материала, с постоянной затухания γ .

Проводя численные расчеты с модельными порошковыми средами, установили зависимость коэффициента затухания от диаметра диэлектрических частиц. Она имеет гиперболический вид и соответствует выражению $\gamma_{\rho,R,\lambda}(d) = \frac{0.5}{d}$,

для расчетной среды с металлическими частицами, получили зависимость коэффициента затухания от диаметра частиц в виде функции $\gamma_{\rho,R,\lambda}(d) = \frac{1.4}{d^{3/2}}$, в среде с металлическими частицами коэффициент затухания излучения больше чем в среде с диэлектриками.

Важным результатом численного моделирования является получение зависимости коэффициента затухания γ от плотности ρ модельной порошковой среды $\gamma_{d,R,\lambda}(\rho)$ при различных диаметрах d . Эта зависимость задается функцией

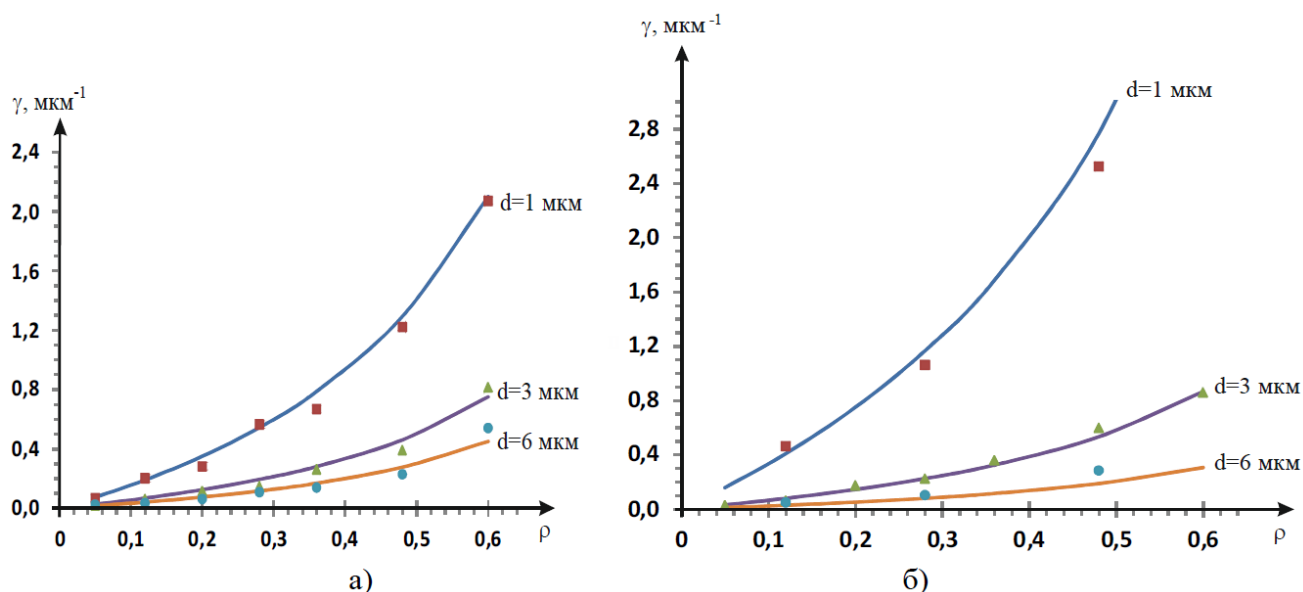


Рис.5. Зависимость коэффициента затухания лазерного излучения от плотности моделируемой порошковой среды для различных диаметров d сферических частиц: а) непрозрачные диэлектрики, б) металлы.

$\gamma_{R,\lambda}(d,\rho) = \frac{3\rho}{2d(1-\rho)}$ для порошковых сред с диэлектрическими частицами, для

сред с металлическими частицами соответственно $\gamma_{R,\lambda}(d,\rho) = \frac{3}{d^{3/2}} \frac{\rho}{1-\rho}$ (рис.5).

Одним из параметров, определяющих эффективность поглощения лазерного излучения гетерогенной средой, является коэффициент R отражения излучения поверхностью каждой из частиц. Итоговая зависимость коэффициента затухания от R , ρ , d параметров порошковой среды с непрозрачными диэлектрическими частицами при постоянной длине волны $\lambda=1$ мкм имеет вид

$\gamma_{\lambda}(d,\rho,R) = 2.6 \frac{(1-0.7R)}{d} \frac{\rho}{1-\rho}$. Для металлических частиц функция $\gamma_{d,\rho,\lambda}(R)$ является

нелинейной во всем интервале значений коэффициента отражения, результаты вычислений представлены следующей функцией (рис.6)

$$\gamma_{d,\rho,\lambda}(R) = \begin{cases} 0.32(1+R-2R^2), & \text{при } d = 3 \text{ мкм} \\ 0.12(1+0.8R-1.3R^2), & \text{при } d = 6 \text{ мкм} \\ 0.08(1+0.2R-0.7R^2), & \text{при } d = 12 \text{ мкм}. \end{cases}$$

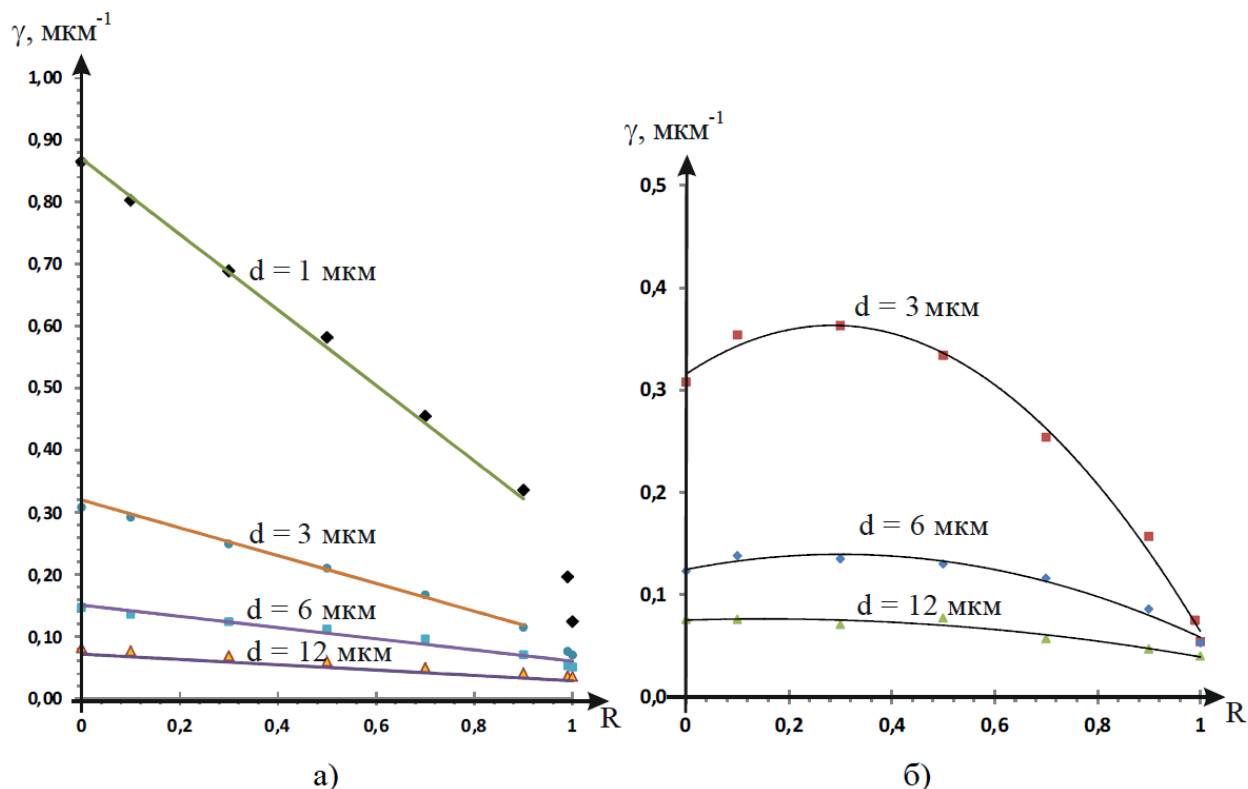


Рис.6. Зависимость коэффициента затухания излучения для частиц порошковой среды с различным диаметром d при постоянной длине волны от коэффициента отражения: а) для непрозрачных диэлектриков; б) для металлов.

Как видно из выражения, функция $\gamma_{d,\rho,\lambda}(R)$ сильно изменяется при различных значениях диаметра частиц в порошке, в отличие от диэлектрических частиц, искомую функцию $\gamma_\lambda(d,\rho,R)$ нельзя представить в виде произведения независимых функций $\gamma_\lambda(d,\rho,R) \neq \gamma_{\rho,R,\lambda}(d)\gamma_{d,R,\lambda}(\rho)\gamma_{d,\rho,\lambda}(R)$. Также видно, что для крупных частиц коэффициент затухания практически не зависит от R и график зависимости $\gamma_{d,\rho,\lambda}(R)$ может быть представлен горизонтальной прямой, что соответствует предельному переходу к геометрической оптике.

Одним из важных параметров, устанавливающих характеристики взаимодействия лазерного излучения с высокодисперсными порошковыми средами, является длина волны λ . Результаты численного моделирования в средах с диэлектрическими частицами приводят к аппроксимирующим функциям вида $\gamma_{d,\rho,R}(\lambda) = \frac{0.34}{d} \exp\left(0.6 \frac{\lambda}{d}\right)$. С граничными условиями для металлических частиц аппроксимирующие функции имеют выраженный максимум, положение которого определяется диаметром частиц как $\lambda_{\max}=d$, результирующая зависимость имеет вид $\gamma_{d,\rho,R}(\lambda) = \frac{6.4}{\lambda\sqrt{d}} \exp\left(-\frac{d}{\lambda}\right)$. Если для непрозрачных диэлектриков с увеличением длины волны наблюдается непрерывный экспоненциальный рост коэффициента затухания, то для металлов вид функции $\gamma_{d,\rho,R}(\lambda)$ сильно изменяется и для случая, когда диаметр частиц много больше длины волны, можно отметить, что γ практически не зависит от λ , что является предельным переходом к геометрической оптике.

На основании расчетов, было получено, что затухание интенсивности лазерного излучения в полидисперсных диэлектрических средах различной плотности соответствует уравнению $\Omega = \sum_{i=1}^n f_i \gamma_i$, где Ω – эффективный коэффициент затухания, f_i – доля фазы с i -м набором параметров; γ_i – коэффициент затухания, рассчитанный для каждой фазы в отдельности по значениям d_i , ρ_i , R_i , в котором значение γ_i для каждой из фаз задавалось выражением $\gamma_\lambda(d, \rho, R) = 2.6 \frac{(1-0.7R)}{d} \frac{\rho}{1-\rho}$. Прямой численный расчет полидисперсных сред с количеством фаз $n=3$ полностью подтвердил данное предположение.

Результаты компьютерного моделирования подтверждают, что в отличие от сплошной среды, где поглощение средой A определяется выражением $A=1-R$, эффективность поглощения порошковой средой тем выше, чем меньше отношение d/λ . Это позволяет сделать вывод, что более дисперсные среды поглощают лазерное излучение эффективнее.

Сравнение результатов численных расчетов при компьютерном моделировании с экспериментом приведено в таблице. Аналитические зависимости для коэффициента затухания γ могут отличаться от значений, полученных численным моделированием до 50 % в некоторых диапазонах зависимых параметров, поэтому выражения для γ могут служить в качестве предварительной оценки. Для более точной оценки γ необходимо проводить численное моделирование с конкретными параметрами порошковой среды. В таблице показано сравнение результатов экспериментального определения γ с 2D и 3D расчетами. Видно, что результаты расчетов показывают хорошее согласование с экспериментом.

В четвертой главе рассмотрена модель теплопереноса при действии лазерного излучения на дисперсные металлические порошки и обоснован вид объемного теплового источника энергии, а также приводятся результаты трехмерного компьютерного моделирования. В первой части сформулирована макроскопическая физико-математическая модель расчета тепловых полей и характеристик зоны оплавления при лазерном спекании порошков. Процесс импульсной лазерной обработки порошкового слоя при моделировании нестационарных тепловых полей описывается моделью с двумя переменными - температурой T и удельной энтальпией H . Это позволило точно учитывать температурный интервал фазового перехода при сохранении абсолютной вычислительной устойчивости. Тогда уравнение теплопроводности в металлической системе с фазовыми переходами, подвергнутой лазерному нагреву, может быть сведено к системе двух уравнений вида $\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial t}$ и $\frac{\partial H}{\partial t} = k(\varepsilon_v) \nabla^2 T + F$, где t – время, $k(\varepsilon_v) = k_0(1 - \varepsilon_v)$ – коэффициент теплопроводности среды, зависящий от проницаемости среды, определяемой пористостью порошкового слоя ε_v , пористость порошка оценивается на основе измерений плотности насыпки и известной плотности металлической фракции, k_0 – коэффициент теплопроводности металлической фазы, F – объемный тепловой источник, учитывающий тепловое воздействие от лазерного луча. Во второй части приводится обоснование вида

объемного теплового источника энергии, учитывающего тепловое воздействие от лазера на порошковую среду. Интенсивность объемного источника может быть принята в виде $F = \Delta P_{noz}$, где ΔP_{noz} – поглощенная мощность лазерного излучения слоем порошковой среды. Она может быть задана уравнением $\Delta P_{noz} = (1 - R)(\gamma)\Delta y P_L(x)\exp[-\gamma y]$. Коэффициент γ зависит как от температуры, так и от фазового состава локального объема, определяя в модели изменение глубины проникновения лазерного излучения при оплавлении частиц. В работе значение коэффициента γ определяется на основании серии экспериментов, с применением фотодатчика и порошковых слоев с различной толщиной. Аналитическое выражение для коэффициента затухания получено при компьютерном моделировании. В третьей части рассмотрено изменение параметров объемного источника энергии в процессе взаимодействия лазерного излучения с порошковыми средами. В четвертой части представлены расчеты с применением трехмерного компьютерного моделирования. Они выявили, что величина температурного градиента в зоне обработки достигает значения 10^7 К/м, скорость нагрева поверхности в режиме облучения составляет 10^8 К/с при скорости охлаждения после прекращения лазерного воздействия $\sim 10^6$ К/с. Результаты расчетов четко продемонстрировали, что коэффициент γ затухания лазерного излучения высокодисперсным порошком определяет глубину d зоны спекания (рис.7).

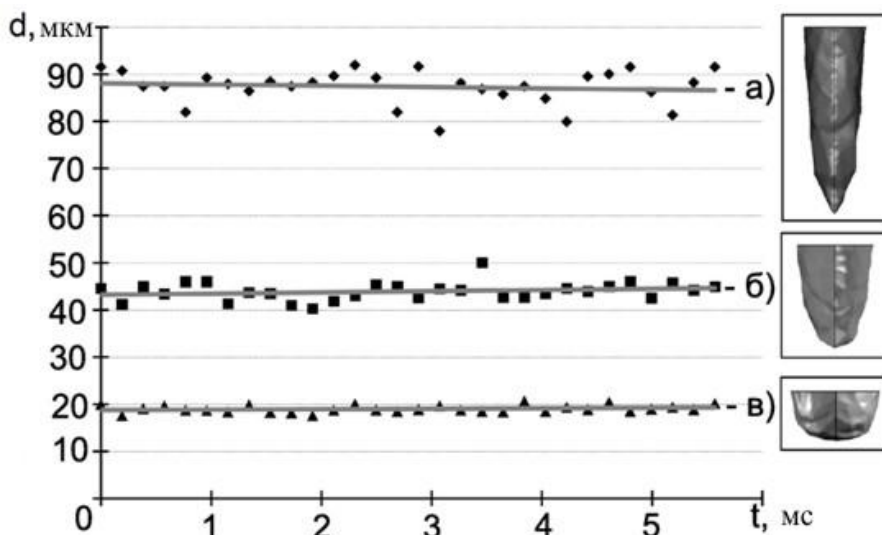


Рис.7. Зависимости глубины d зоны спекания от времени, полученные при численном моделировании при разных значениях коэффициента затухания γ : а) $\gamma = 0,01$ мкм⁻¹, б) $\gamma = 0,02$ мкм⁻¹, в) $\gamma = 0,05$ мкм⁻¹. Справа показана форма зоны оплавления для соответствующих значений γ .

В заключении диссертации сформулированы основные результаты и выводы по работе.

1. Разработанный экспериментальный метод измерения интенсивности рассеянного лазерного излучения в зависимости от толщины порошкового слоя и угла рассеяния позволил установить, что прохождение излучения с $\lambda=1,064$ мкм через высокодисперсный порошковый слой может быть описано экспоненциальной зависимостью $P = P_L \exp(-\gamma h)$, где γ - коэффициент затухания лазерного излучения, h - толщина порошкового слоя до 150 мкм. Наибольшая часть рассеянной мощности заключена внутри области, ограниченной малыми углами до 8° .

2. В предложенной математической модели на основе уравнений электродинамики сплошных сред показано, что моделирование взаимодействия лазерного излучения с высокодисперсными порошковыми средами может быть осуществлено для состояния со стационарным распределением объемной плотности энергии с помощью уравнения Гельмгольца и граничных условий, описывающих взаимодействие деполяризованного лазерного излучения с поверхностью порошка.

3. С помощью компьютерного моделирования доказано, что при изучении распространения лазерного излучения в среде с металлическими частицами необходимо учитывать волновую природу распространяющегося излучения в случае, когда длина волны лазерного излучения сопоставима со средним размером полидисперсных частиц. Коэффициент затухания лазерного излучения является функцией длины волны, коэффициента отражения, диаметра частиц и плотности насыпки порошка.

4. Установлено, что коэффициент затухания лазерного излучения в высокодисперсных порошках определяет глубину зоны спекания.

5. Показано, что выражение объемного теплового источника энергии, учитывающего тепловыделение в порошковой области толщиной Δu , расположенной на глубине u , должно учитывать коэффициент затухания γ как

$F = (1 - R)(\gamma)\Delta y P_L(x) \exp[-\gamma y]$, где R – коэффициент отражения от поверхности частиц порошка, $P_L(x)$ – распределение мощности лазера по x координате.

Основные результаты в полном объеме отражены в публикациях:

В журналах из перечня, рекомендуемых ВАК РФ:

1. Костенков, С. Н. Метод определения характеристик взаимодействия лазерного излучения с нанокompозитными порошковыми материалами / С. Н. Костенков, Е. В. Харанжевский, М. Д. Кривилев // ФММ. – 2012. – Т. 113. – № 1. – С. 98–103.

2. Kharanzhevskiy, E. V. Modeling of laser radiation transport in powder beds with high-dispersive metal particles / E. V. Kharanzhevskiy, S. N. Kostenkov // Journal of Alloys and Compounds. – 2014. – V. 576. – P. 246 – 249.

3. Костенков, С. Н. Численное исследование переноса лазерного оптического излучения в высокодисперсных порошковых средах / С. Н. Костенков, Е. В. Харанжевский // Химическая физика и мезоскопия. – 2014. – Т. 16. – № 1. – С. 68 – 81.

Материалы и тезисы конференций:

1. Костенков, С. Н. Поглощение лазерного излучения ультрадисперсными порошковыми материалами / С. Н. Костенков, Е. В. Харанжевский // материалы IX Всероссийской конференции «Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем». Ижевск, ноябрь 2010 г., – С. 190 – 191.

2. Костенков, С. Н. Моделирование переноса лазерного излучения в металлических ультрадисперсных порошках / С. Н. Костенков, Е. В. Харанжевский // материалы четвертой Международной конференции «От наноструктур, наноматериалов и нанотехнологий к наноиндустрии». Ижевск, апрель 2013 г., – С. 55 – 56.

3. Kharanzhevskiy, E. V. 3D modeling of laser radiation transport in powder beds with high-dispersive metal particles / E. V. Kharanzhevskiy, S. N. Kostenkov // the-

ses reports European congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes, Euromat 2013. Sevilla, Spain, September 2013 г.

4. Костенков, С. Н. 3D моделирование транспорта энергии лазерного излучения в ультрадисперсных порошковых средах с металлическими частицами / С. Н. Костенков, Е. В. Харанжевский // материалы V Всероссийской конференции по наноматериалам «НАНО 2013». Звенигород, сентябрь 2013 г. – С. 67 – 68.

Прочие публикации по работе:

1. Костенков, С. Н. Рассеяние и поглощение лазерного излучения при его прохождении через ультрадисперсные порошковые среды / С. Н. Костенков, Е. В. Харанжевский // Вестник Удмуртского университета. Сер. Физика. Химия. – 2011. – Вып.1. – С. 13 – 23.

2. Костенков, С. Н. Рассеяние лазерного излучения на полидисперсных сферических частицах / С. Н. Костенков, Е. В. Харанжевский // Вестник Удмуртского университета. Сер. Физика. Химия. – 2012. – Вып. 1. – С. 31 – 38.

3. Харанжевский, Е. В. 2D моделирование переноса лазерного излучения в дисперсных металлических порошковых средах / Е. В. Харанжевский, С. Н. Костенков // Вестник Удмуртского университета. Сер. Физика. Химия. – 2012. – Вып. 3. – С. 33 – 43.

4. Костенков, С. Н. К выбору граничных условий для 3D численного моделирования транспорта энергии в металлических порошковых средах / С. Н. Костенков, Е. В. Харанжевский // Вестник Удмуртского университета. Сер. Физика. Химия. – 2013. – Вып. 2. – С. 68 – 72.