

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи



ИШКИНЯЕВ ЭМИЛЬ ДАМИРОВИЧ

**ФОРМИРОВАНИЕ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ
ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ В
УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРОФИЛЯ
ИНТЕНСИВНОСТИ ЛУЧА**

Специальность 1.3.19 – Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2023

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

**Научный
руководитель:**

Петровский Виктор Николаевич

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ (412) Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ, г. Москва

**Официальные
оппоненты:**

Овчинников Виктор Васильевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение», ФГАОУ ВО "Московский политехнический университет", г. Москва

Глова Александр Федорович

доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник отделения теоретической физики, вычислительной математики и перспективных разработок, АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ", г. Москва, г. Троицк

Богданов Александр Владимирович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Защита состоится «27» марта 2024 г. в 17:00 часов на заседании диссертационного совета МИФИ.1.01 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <https://ds.mephi.ru> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан " ____ " _____ 202__ года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физ.-мат. наук

 Степаненко А.А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

В настоящее время лазерные системы активно используются в различных отраслях промышленности. Использование лазерного излучения в качестве направленного источника энергии с высокой точностью локализации и скоростью изменения параметров особенно привлекательно для процессов металлообработки, таких как термообработка, резка, сварка, наплавка и ряда других смежных технологий [1]. Лазерная термическая обработка — это современная технология модифицирования поверхности, используемая для повышения эксплуатационных характеристик металлических изделий. Термообработка представляет из себя совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения твердых сплавов для изменения внутренней структуры материала. Основной проблемой при лазерном воздействии является сложность установления и контроля температурного режима. Температура нагрева при этом не является задаваемым значением, а косвенно зависит от параметров лазерного излучения (длины волны, распределения интенсивности, времени воздействия и др.) [2–4], геометрии обрабатываемого изделия [5], характеристик теплоотводящей среды [6], физических и оптических свойств материалов [7]. Вследствие огромного количества факторов, влияющих на температурный режим и итоговые свойства материала при лазерном воздействии, исследования по поиску оптимальных методов обработки не прекращаются по сей день.

Кроме неоспоримых преимуществ использования лазерных технологий в процессах металлообработки, существуют и недостатки, устранению которых уделяется большое внимание. Во многих процессах лазерной обработки невыполнение условия формирования подходящего термического цикла является причиной возникновения дефектов. Существует большое количество работ по лазерной сварке, направленных на предотвращение появления пор и трещин, связанных с высокими градиентами температур в области воздействия [8, 9]. Набирающие большую популярность аддитивные технологии имеют

проблему анизотропии свойств деталей при печати металлическим порошком из-за неравномерного тепловложения и теплоотвода в процессе выращивания, а также нестабильности ванны расплава при воздействии гауссовым лучом [10, 11]. При лазерной закалке деталей с различными конструктивными элементами (отверстиями, пазами, канавками) лучом с постоянным профилем интенсивности наблюдается оплавление кромок и непостоянная глубина упрочненного слоя [12]. Все перечисленные недостатки возникают из-за значительного различия температур в объеме обрабатываемой области при лазерном воздействии со стандартным гауссовым или п-образным распределением интенсивности. В связи с этим, актуальной является задача формирования контролируемых температурных полей при лазерной обработке путем преобразования профиля интенсивности излучения в соответствии со спецификой поставленной задачи. Желательно иметь возможность динамического изменения энергетического дозирования для получения однородных свойств в области модификации изделий произвольной формы.

Целью диссертационной работы является разработка методики формирования контролируемых температурных полей в процессе обработки металлических материалов с использованием лазерного излучения, формируемого статическими и динамическими оптическими системами.

Для достижения цели работы были поставлены следующие **задачи**:

1. Построение математической модели расчета температурных полей и кинетики фазовых превращений, индуцированных лазерным воздействием, которая позволяет определить границы зоны модифицирования структуры приповерхностного слоя.

2. Определение влияния изменения профиля интенсивности лазерного луча на температурное распределение в приповерхностном слое обрабатываемого материала.

3. Разработка метода получения заданного профиля интегральной интенсивности излучения с использованием сканирующей оптической системы.

4. Разработка алгоритма оптимизации технологических параметров обработки металлических изделий с различной геометрической формой для получения равномерного нагрева приповерхностного слоя.

5. Апробирование разработанной методики обработки в задачах лазерной закалки промышленных изделий и научно-исследовательской работе по получению композитных материалов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые построена модель, позволяющая определить сдвиги критических температур аустенизации стали с заданными теплофизическими свойствами при лазерной закалке, путем решения сопряженной задачи теплопроводности и кинетики фазовых превращений. В зависимости от параметров лазерного луча сдвиги температур могут превышать 100 °С по сравнению с литературными данными для традиционной объемной закалки с длительной выдержкой.

2. Впервые разработана методика расчета и получения оптимизированного профиля интегральной интенсивности квазистатического пятна лазерного излучения, получаемого при осцилляциях гауссова луча с частотой более 50 Гц с модуляцией мощности и скорости движения.

3. Впервые разработан и реализован алгоритм расчета параметров осциллирующего луча путем решения обратной задачи теплопроводности для получения равномерного, с точностью до 100 °С, температурного распределения в приповерхностном слое изделия произвольной геометрической формы при лазерной термообработке.

4. Впервые получен композитный материал с аустенитной γ -фазой в матрице мартенситной α -фазы в сплаве Fe-18Cr-10Ni с минимальной переходной зоной за счет реализации равномерного нагрева материала лазерным излучением в узком диапазоне температур 600-700 °С.

5. Путем изменения формы и объемной доли областей γ -фазы, распределенных по заданному закону в исходной α -фазе, впервые удалось варьировать интегральный предел прочности полученного композитного

материала на основе сплава Fe-18Cr-10Ni в пределах 20% и максимальную деформацию в пределах 50%.

Практическая и теоретическая значимость разработанной методики формирования динамически управляемой интенсивности излучения заключается в расширении области применения лазерных систем в задачах термической обработки. Появляется возможность равномерной закалки изделий с криволинейной поверхностью без оплавления. Данный метод после некоторого модифицирования может быть использован при лазерной сварке для контроля термического цикла с целью предотвращения порообразования и возникновения трещин. Результаты работы по формированию композитных структур путем локальной лазерной обработки могут быть полезны в тех областях машиностроения, где требуется получение новых материалов с уникальными механическими и магнитными свойствами. Математическая модель расчета температурных полей при воздействии статическим и осциллирующим лучом, построенная в рамках данной работы, активно применялась в выполнении НИР и заказов в секторе «Наплавки и термической обработки» ООО НТО «ИРЭ-Полюс» для ускорения подбора режимов и повышения качества обработки при лазерной закалке реальных промышленных изделий.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная математическая модель расчета теплопередачи и кинетики фазовых превращений при различных условиях лазерной обработки, позволяющая определить границы зоны закалки инструментальных сталей с точностью более 85%.

2. Разработанный метод преобразования формы и распределения интенсивности пятна лазерного излучения с применением высокочастотных колебаний, позволяющий получить однородный нагрев приповерхностного слоя.

3. Алгоритм расчета параметров лазерной закалки изделий произвольной формы осциллирующим лучом, основанный на решении обратной задачи теплопроводности, для равномерного нагрева поверхности с погрешностью менее 100 °С.

4. Метод создания композиционных материалов на основе сплава Fe-18Cr-10Ni с контролируемыми механическими свойствами путем осуществления локального обратного мартенситного $\alpha \rightarrow \gamma$ перехода при лазерном воздействии.

Диссертационная работа по своему содержанию соответствует следующим пунктам **паспорта специальности 1.3.19 – «Лазерная физика»**:

1. Лазеры и лазерная оптика; новые лазерные среды и новые лазерные источники; лазерные системы.

2. Взаимодействие лазерного излучения с веществом; лазерная плазма; лазерные установки и в том числе со сверхсильными световыми полями; генерация и ускорение заряженных частиц; генерация наночастиц и модификация поверхности, создание на этой основе датчиков и устройств.

Личный вклад автора

Все выносимые на защиту результаты и положения диссертационной работы получены и разработаны автором лично, либо при его непосредственном участии. Автор участвовал в постановке, проведении и обработке результатов всех экспериментов.

Достоверность научных положений, выводов и результатов подтверждена множеством экспериментальных данных, полученных на современном сертифицированном оборудовании с применением общепринятых научно-обоснованных методов. Измерения механических свойств обрабатываемых материалов выполнены в соответствии с государственными стандартами.

Апробация работы

Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих всероссийских и международных конференциях:

1. VII Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2021», Москва, 2021.

2. XXVIII Международная научная конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», Москва, 2021.

3. X Международная конференция «Лучевые технологии и применение лазеров», Санкт-Петербург, 2021.

4. 19 Международная школа конференция «Новые материалы: Перспективные технологии получения и обработки материалов», Москва, 2021.

5. Международная конференция «Актуальные проблемы прочности», Минск, 2022.

6. VIII Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2022», Москва, 2022.

7. Научно-технический семинар «Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов», Москва, 2022

8. IX Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2023», Москва, 2023.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 8 печатных работ в период с 2018 по 2023 год, из них 2 статьи в рецензируемых журналах, индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science, 6 статей в журналах, включенных в перечень ВАК РФ.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения и изложена на 128 страницах машинописного текста, включая 84 рисунка, 10 таблиц и список литературы, содержащий 112 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснованы актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна и практическая значимость работы, представлены основные положения, выдвигаемые на защиту.

Первая глава содержит детальный литературный обзор современных технологий термической обработки металлических сплавов лазерным лучом. Проанализированы проблемы, ограничивающие использование данной технологии, такие как сложность установления однородного температурного цикла в приповерхностном слое при лазерном воздействии и разупрочнение материала при многопроходной обработке изделий с площадью, превышающей

размеры лазерного излучения. Рассмотрены работы, в которых представлены модели расчета температурных полей и фазовых превращений в процессе лазерной закалки. Температурное распределение, индуцированное лазерным воздействием, можно определить на основе решения дифференциального уравнения теплопроводности с граничным условием в виде поверхностного источника тепла. В процессе нагрева происходит фазовое превращение исходной структуры в аустенит с последующим процессом гомогенизации, которые можно рассчитать, используя второй закон диффузии Фика, где коэффициент диффузии углерода определяется соотношением Аррениуса. При последующем охлаждении аустенита происходит его переход в мартенсит, если скорость охлаждения достаточно велика, или в бейнит при меньших скоростях охлаждения. Мартенситное превращение является бездиффузионным и обычно определяется уравнением Койстинена-Марбургера, в то время как бейнитное превращение является диффузионным и адекватно описывается моделью Джонсона-Мела-Аврами-Колмогорова [13].

В рамках данной главы также рассмотрены современные решения по преобразованию профиля интенсивности лазерного луча для получения равномерного теплового фронта, необходимого для получения однородной зоны модификации. Рассмотрены различные способы формирования профиля пятна лазерного излучения с использованием дифракционных и преломляющих оптических элементов. Показано, что система позволяющая производить колебания луча с высокой частотой может использоваться как динамический формирователь квазистатического пятна, как более универсальная альтернатива статическим оптическим элементам с точки зрения возможности изменения ширины области воздействия.

Во второй главе приведены основные характеристики экспериментальной установки для лазерной термической обработки, использованной при выполнении диссертационной работы. Источником излучения являлся волоконный иттербиевый лазер ЛС-10 производства IPG с длиной волны 1070 нм и максимальной мощностью 10 кВт. Данный лазер работает в непрерывном

режиме с возможностью внешней модуляции мощности излучения. Доставка излучения на обрабатываемую поверхность производилась через транспортное волокно, подсоединенное к оптической головке. Для преобразования распределения энергии, передаваемой поверхности материала использовались три вида оптических систем:

1. Оптическая головка IPG D50W, формирующая луч с гауссовым распределением интенсивности и имеющая функцию пространственной развертки луча с частотой колебаний до 500 Гц.

2. Модуль формирователя прямоугольного пятна с близким к равномерному распределением интенсивности. Данная система имеет коллимирующую линзу и бипризму Френеля, проходя через которую входной гауссов луч разбивается на два линейных. При совмещении лучей в фокусной плоскости получается прямоугольное равномерное пятно размерами 10×1 мм.

3. Сканатор IPG 2D High-Power Scanner, позволяющий сканировать лазерное излучение с гауссовым распределением интенсивности со скоростью до 10 м/с в пределах рабочей области 200×200 мм по любой траектории с переменной мощностью излучения.

В данной главе также описаны методики измерений параметров лазерного излучения, температуры в процессе воздействия с использованием тепловизора и итоговых механических свойств обрабатываемых изделий. Микротвердость обрабатываемых материалов в зоне модифицирования определялась по методу Виккерса путём вдавливания алмазной пирамиды, которая имеет угол при вершине в 136°, на установке DuraScan 50. Испытания на растяжение проводились на разрывной машине INSTRON 5966.

Представлены основы метода корреляции цифровых изображений (КЦИ), который использовался для анализа деформационного поведения образцов при приложении растягивающей нагрузки. Метод КЦИ – является одним из бесконтактных оптических методов измерения напряженно-деформированного состояния образца при проведении механических испытаний. Данный метод путем сравнения спекл-структуры пары изображений позволяет произвести

анализ формы поверхности объекта и получить информацию о локальных механических характеристиках образцов, что наиболее актуально при исследовании композиционных материалов.

В третьей главе описана процедура разработки математической модели процесса воздействия лазерного излучения на металлический материал и ее реализация в среде численного моделирования COMSOL Multiphysics путем решения уравнений теплопроводности и фазовых превращений. Решение для температурных полей считалось по нестационарному нелинейному уравнению теплопроводности (1) с заданными начальными (2) и граничными условиями лазерного нагрева, конвективного теплообмена с воздухом и теплового излучения (3).

$$C_p(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(k(T) * \nabla T) = Q \quad (1)$$

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \quad (2)$$

$$-\vec{n}\vec{q} = Q_L + h(T_{amb} - T) + \varepsilon\sigma(T_{amb}^4 - T^4), \quad (3)$$

где $C_p(T)$ – удельная теплоемкость при постоянном давлении, $\rho(T)$ – плотность, $k(T)$ – коэффициент теплопроводности, Q – мощность источника тепла на единицу объема, T_0 – начальная температура материала, \vec{n} – вектор нормали к поверхности детали, \vec{q} – поверхностная плотность теплового потока, T_{amb} – температура окружающей среды, h – коэффициент теплоотдачи, ε – излучательная способность поверхности, σ – постоянная Стефана-Больцмана, Q_L – распределение плотности мощности поверхностного источника тепла.

Аустенитный переход рассчитывался по модели Леблона-Дево (4), без учета процесса диффузии, из-за малого времени воздействия при быстром лазерном нагреве:

$$\dot{\xi}^A = \frac{\xi_{eq}^A - \xi^A}{\tau_{P \rightarrow A}}, \dot{\xi}^A > 0, T > Ac_1 \quad (4)$$

$$\dot{\xi}^P = -\dot{\xi}^A,$$

где ξ - доля фазы (индекс А - аустенит, Р – перлит, В – бейнит, М - мартенсит), ξ_{eq} - равновесная доля фазы при длительной выдержке при определенной

температуре, $\tau_{P \rightarrow A}$ – временная константа, которая показывает через какое время начнется фазовый переход при достижении определенной температуры, A_{c1} – температура начала перехода перлита в аустенит [14].

Диффузионный переход аустенита в бейнит описывался моделью Джонсона-Мела-Аврами-Колмогорова (5):

$$\dot{\xi}^B = \frac{(\xi_{eq}^B - \xi^B) * n_{A \rightarrow B}}{\tau_{A \rightarrow B}} \left(-\ln \left(1 - \frac{\xi^B}{\xi_{eq}^B} \right) \right)^{1 - \frac{1}{n_{A \rightarrow B}}}, \quad \dot{\xi}^A > 0, T < A_{c3}$$

$$\dot{\xi}^A = -\dot{\xi}^B, \quad (5)$$

$$n_{A \rightarrow B} = \frac{\ln \left(\frac{\ln(1 - X_1)}{\ln(1 - X_2)} \right)}{\ln \left(\frac{t_1}{t_2} \right)}, \quad \tau_{A \rightarrow B} = \frac{t_1}{(-\ln(1 - X_1))^{\frac{1}{n_{A \rightarrow B}}}}$$

где A_{c3} – температура полного растворения феррита/цементита в аустените, X_1 и X_2 – начальная и конечная доля фазы бейнита (обычно 0,1% и 99,9 %), который образуется за время в промежутке от t_1 до t_2 [15].

Бездиффузионный переход аустенита в мартенсит рассчитывался по модели Койстинена-Марбургера (6):

$$\dot{\xi}^M = -\xi^A \beta \dot{T}, \quad \dot{T} < 0, T < M_s$$

$$\dot{\xi}^A = -\dot{\xi}^M, \quad (6)$$

$$\beta = \frac{\ln(0.1)}{M_e - M_s},$$

где M_s и M_e – температуры начала и конца мартенситного превращения [16].

В результате совместного численного решения всех дифференциальных уравнений с заданными граничными условиями лазерного воздействия было получено температурное поле по всей области расчета и объемное распределение долей фаз в любой момент времени. Корректность построенной модели была подтверждена экспериментальными результатами лазерной обработки различных сталей в широком диапазоне технологических параметров воздействия. Погрешность определения глубины закалки составила менее 15%.

Также в рамках главы описана процедура моделирования обработки сканирующим лучом с высокой частотой осцилляций. Показано, что такой способ воздействия позволяет получить равномерный тепловой фронт и аналогичен обработке широким стационарным пятном излучения (рисунок 1).

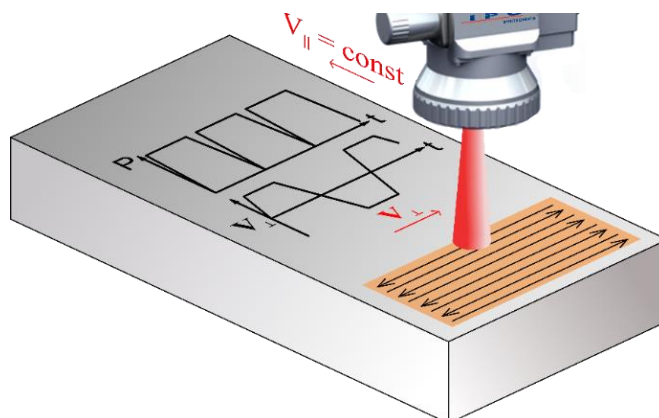


Рисунок 1 - Схема лазерной обработки со сканирующей системой.

Разработана методика аппроксимации колеблющегося гауссова луча квазистатическим источником с интегральным распределением интенсивности на основе решения интеграла (7), что позволяет существенно сократить время расчета. При использовании данного упрощения усредняются температурные кривые в области обработки, так как колебания лазерного луча заменяются статическим широким пятном излучения. При частоте колебаний 50 Гц погрешности определения температур не превышают 100 °С на поверхности и уменьшаются при удалении вглубь материала. С повышением частоты осцилляций отличия температур определенных двумя методами расчета снижаются и точность модели с методом аппроксимации интегральной интенсивностью растет.

$$I(x, y) = \frac{1}{t_{\pi}} \int_0^{t_{\pi}} \frac{2P(t, x, y)}{\pi D^2} \exp\left(-8 \frac{(x - x_0 - V_{\parallel} t)^2 + (y - y_0 - \int V_{\perp} dt)^2}{D^2}\right) dt, \quad (7)$$

где P – мощность излучения, D – диаметр пятна излучения, V_{\parallel} – скорость поступательного движения оптической системы (или детали), V_{\perp} – скорость колебательного движения луча, t_{π} – период колебаний.

В четвертой главе показана возможность создания квазистатического пятна излучения различной формы и профиля интенсивности за счет осуществления гармонических колебаний луча по двум перпендикулярным осям с модулированной скоростью движения (рисунок 2). Проанализировано влияние параметров обработки (мощность излучения, диаметр пятна, амплитуда и частота осцилляций) при осцилляциях луча по различной траектории на температурные поля в процессе воздействия. Показано, что при колебаниях гауссова луча с амплитудой, превышающей радиус пятна, формируется более равномерное температурное поле в зоне воздействия, чем при обработке без колебаний.

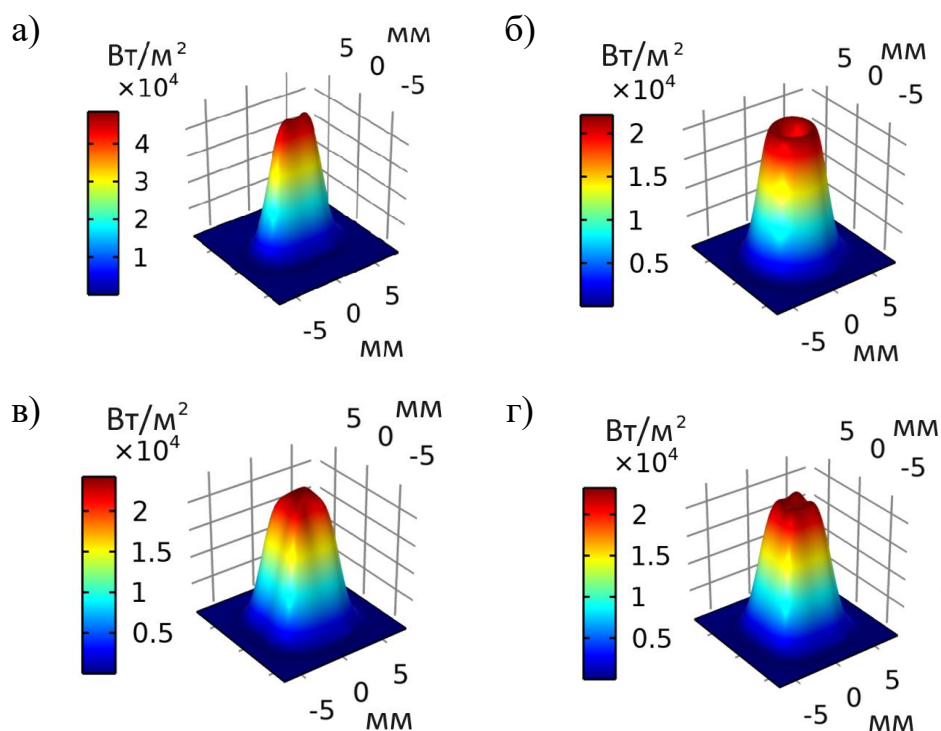


Рисунок 2 – Интегральные интенсивности квазистатических пятен при колебаниях луча мощностью 1 Вт с амплитудой, равной радиусу пятна, по траектории а) – линии, б) – окружности, в) – восьмерки, г) – двойной восьмерки.

Разработана методика формирования линейного квазистатического пятна с управляемым профилем интенсивности за счет модулирования мощности излучения в пределах периода колебаний луча (рисунок 3-а). Разработан и реализован алгоритм получения равномерных температурных полей в приповерхностном слое изделия с произвольной геометрией путем решения

обратной задачи теплопроводности и оптимизации модуляции мощности излучения (рисунок 3-б). Экспериментально показана возможность равномерного нагрева изделия шириной 100 мм с криволинейной поверхностью колеблющимся лучом в один проход (рисунок 3-в, г).

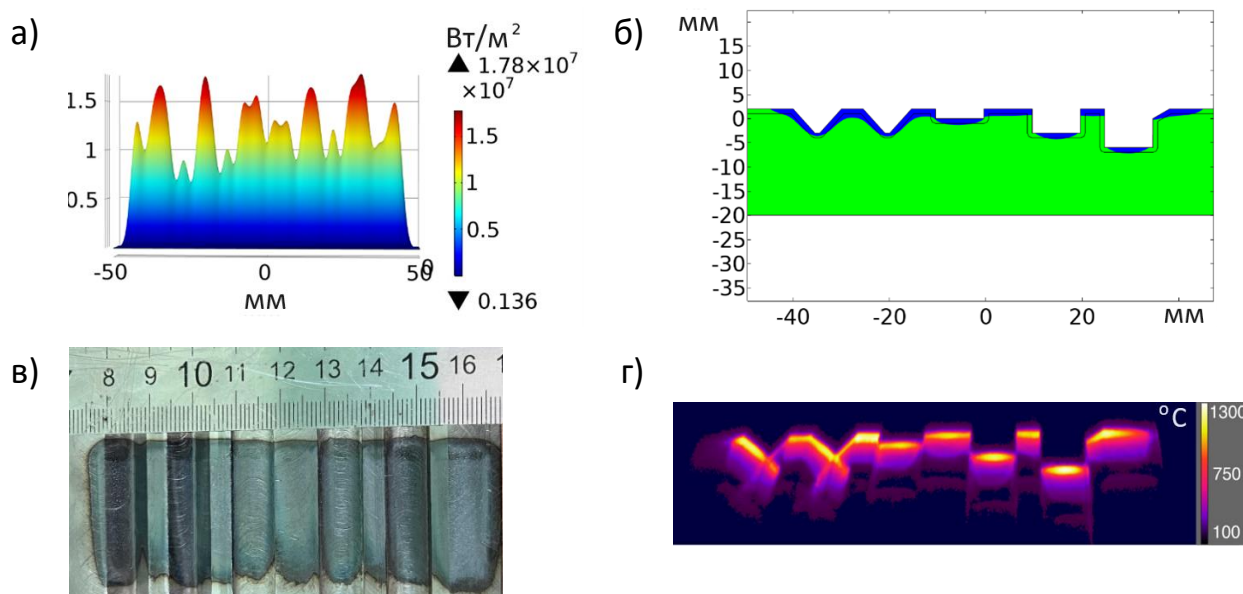


Рисунок 3 – Результат моделирования и обработки изделия с криволинейной поверхностью колеблющимся лазерным лучом с модулированной мощностью излучения. а) – интегральная интенсивность квазистатического пятна, б) - температурное поле в поперечном сечении образца во время обработки (зеленым цветом выделена область с температурой ниже 860°C , синим – ниже 1500°C), в) – внешний вид детали после обработки, г) – температурное распределение на поверхности при обработке, зарегистрированное тепловизором.

Функция изменения мощности рассчитывалась исходя из входного параметра, которым выступала температура плавления материала – как максимальное значение, которое может наблюдаться в каждой точке поверхности обработки, с допустимым отклонением в меньшую сторону в 100°C . Выходным параметром являлась функция изменения мощности излучения во времени в процессе обработки. Самым простым способом модуляции мощности на реальном сканаторе является ступенчатое изменение по дискретным значениям. Т.е. линия, по которой колеблется луч делится на n элементов, по каждому из которых луч пробегает с заданной мощностью (рисунок 4).

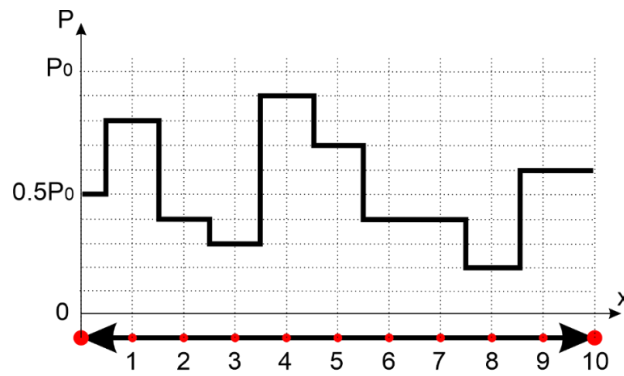
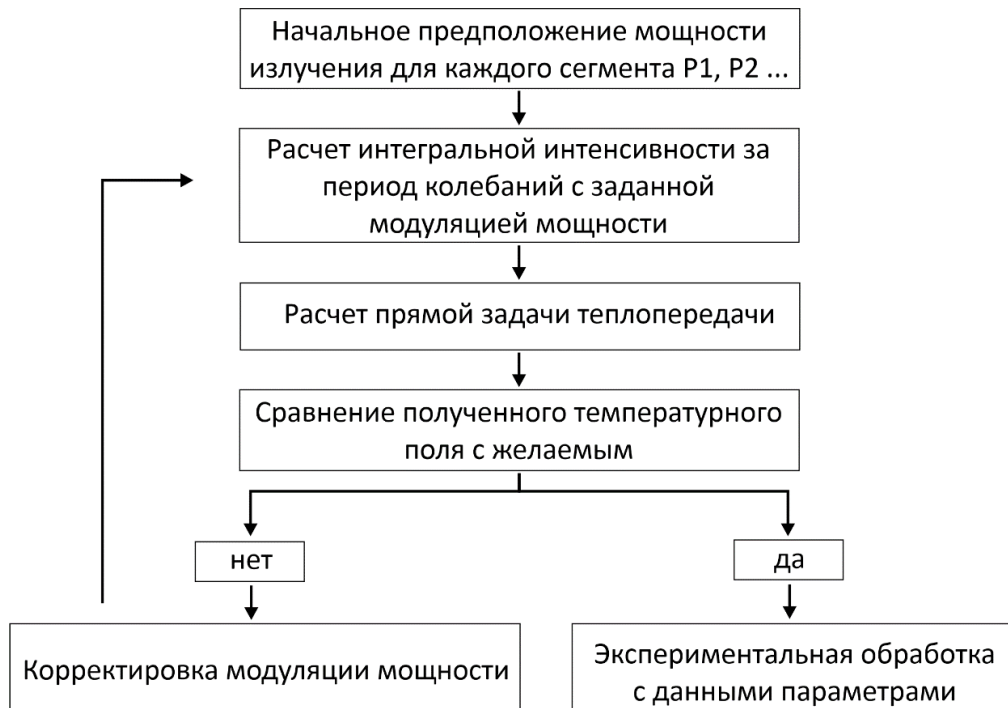


Рисунок 4 – Схема изменения мощности излучения вдоль линии колебаний лазерного луча.

Алгоритм оптимизации параметров обработки для получения равномерного температурного поля на поверхности изделия, реализованный в Matlab, выполняет следующие шаги:



Корректировка функции модуляции мощности проводилась по формуле (8)

$$P(i + 1) = P(i) \left(1 + \frac{(T_{req} - T(i))}{T_{req}} \right), \quad (8)$$

где $P(i)$ – мощность на i -ой итерации, T_{req} – желаемая температура на обрабатываемой поверхности, $T(i)$ – температура в точке измерения, полученная в результате расчёта на i -ой итерации.

В пятой главе приведены основные результаты создания композитных материалов на основе сплава Fe-18Cr-10Ni путем локального воздействия лазерным излучением. Показано, что данная сталь в мартенситном состоянии, полученная путем холодной пластической деформации, претерпевает обратный мартенситный переход в результате нагрева в интервале температур 600-700°C с существенным изменением магнитных и механических свойств. При этом использование лазеров для термообработки позволяет получить аустенит с твердостью значительно выше, чем у "обычного" аустенита, образовавшегося в сплаве при горячей деформации или длительной выдержке при температурах обратного мартенситного превращения. Наблюдаемое упрочнение аустенита связано с процессом превращения мартенсита в аустенит при сверхбыстром нагреве и охлаждении.

Показано, что при обработке лазерным излучением с гауссовым профилем интенсивности невозможно достичь однородного преобразования структуры материала в заданном объеме вследствие значительного различия температурных циклов. Поэтому для осуществления равномерного нагрева использовался луч с прямоугольным пятном и плоским профилем интенсивности. Однако, формирование однородных температурных полей в тонких пластинах является сложным процессом из-за высокой чувствительности малых объемов к перегреву. В связи с чем необходимо подобрать законы изменения параметров воздействия для поддержания стационарного теплового фронта в процессе обработки. Для этого была построена математическая модель, позволяющая определить функцию мощности излучения от времени для поддержания равномерного нагрева пластин в узком диапазоне температур для формирования однородных областей различных фаз. Экспериментально получены образцы с композитной структурой с чередующимися α и γ фазами с минимальной переходной зоной (рисунок 4).



Рисунок 4 - Образцы с композитной структурой, полученные локальной лазерной обработкой.

Показана возможность варьирования механических свойств композитов путем изменения закона распределения различных фаз. Исследовано влияние формы и объемной доли областей двух фаз на интегральные кривые диаграммы «напряжения-деформации» (рисунок 5).

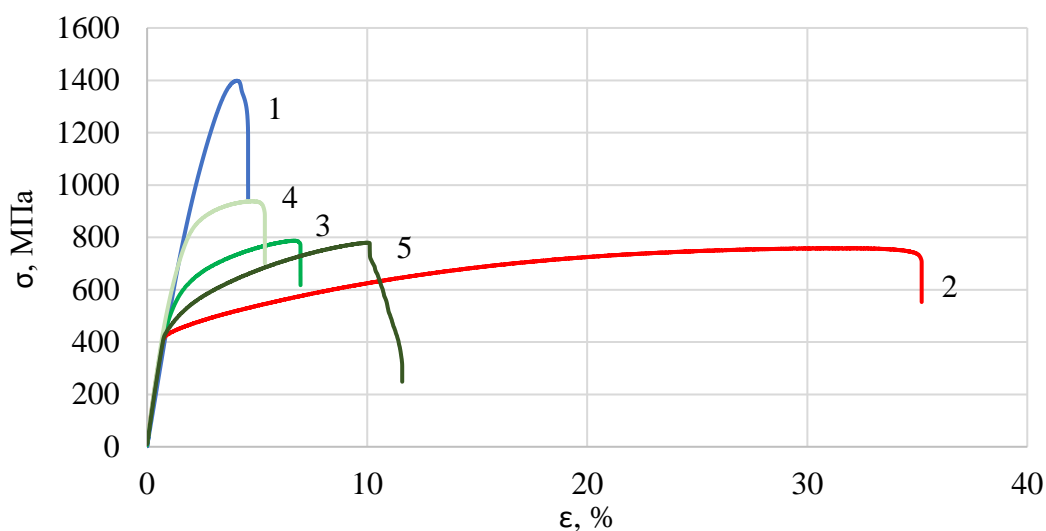


Рисунок 5 - Диаграммы “напряжение-деформация” испытываемых образцов (1 – необработанный, 2 – полностью обработанный, 3 – область обработки в форме круга, 4 – квадрата, 5 – параллелограмма).

С использованием метода корреляции цифровых изображений проанализирована динамика деформирования образцов при нагружении и определены упругие свойства исходной α фазы и полученной после лазерной обработки γ фазы (таблица 1).

Таблица 1 - Упругие свойства сплава в мартенситном и аустенитном состояниях.

Структурное состояние	Модуль Юнга 10^5 , МПа	Коэффициент Пуассона
α -фаза (мартенсит)	$1,74 \pm 0,15$	$0,33 \pm 0,04$
γ -фаза (аустенит)	$1,22 \pm 0,16$	$0,37 \pm 0,03$

Наблюдаемые различия в разрушении композитных материалов с различными формами областей двух фаз связаны с распределением внутренних напряжений, возникающих вследствие взаимной деформации аустенитных и мартенситных областей. Образование внутренних напряжений связано с тем, что при лазерной термообработке при нагреве материала выше критической температуры происходит переход в γ -фазу, которая имеет больший удельный объем по сравнению с исходной α -фазой. Вторая причина изменения интегральных механических характеристик композитных образцов с различным законом распределения фаз заключается в характере взаимодействия макрозон с разными механическими свойствами между собой при нагружении.

В заключении представлены основные выводы и результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Построена подтвержденная экспериментальными результатами модель расчета температурных полей и распределения фаз в объеме обрабатываемого изделия в процессе лазерной закалки. Модель позволяет с точностью более 85% оценить размеры зоны закалки в широком диапазоне технологических параметров обработки средне- и высокоуглеродистых сталей с различным содержанием легирующих добавок.

2. Проанализировано влияния распределения плотности мощности в пятне излучения на равномерность индуцируемых при лазерном воздействии температурных полей. Разработана методика расчета профиля интенсивности квазистатического пятна лазерного луча, осциллирующего с высокой частотой. Показано, что изменением траектории колебаний луча можно влиять на форму квазистатического пятна, а модулируя скорость движения и мощность излучения – формировать профиль интенсивности.

3. Разработан алгоритм формирования заданного температурного распределения в приповерхностном слое обрабатываемого материала с произвольной геометрической формой. Метод основан на модуляции функций мощности излучения при высокочастотных линейных колебаниях луча. Оптимизация параметров обработки выполнялась решением обратной задачи

теплопроводности, где по известному температурному распределению выполняется поиск граничного условия. Показана возможность равномерного нагрева, с погрешностью менее 100 °С, криволинейной поверхности колеблющимся гауссовым лучом с модуляцией мощности излучения.

4. Получены композитные материалы на основе сплава Fe-18Cr-10Ni с различным законом распределения мартенситной (α) и аустенитной (γ) фаз с использованием лазерной термообработки. Путем оптимизации параметров воздействия с применением построенной модели расчета температурных полей минимизированы неоднородности нагрева в области обработки и переходные зоны участков изменения фаз. Методом корреляции цифровых изображений определены упругие характеристики различных фаз. Аустенит, образованный при лазерном нагреве, обладает в 1,5 раза меньшим модулем Юнга и на 12% большим коэффициентом Пуассона.

5. Показана возможность изменения интегральных механических характеристик композитных материалов путем создания различного паттерна пластичной γ -фазы в прочной матрице α -фазы. Проанализировано влияние формы и объема областей с γ -фазой на деформационное поведение композитных образцов при растяжении. При изменении закона распределения различных фаз, полученных лазерной обработкой, возможно изменение предела прочности композитного материала в диапазоне 760-940 МПа, а максимальной относительной деформации в пределах 5-10%.

Основные результаты работы автора представлены в следующих публикациях.

1. Исследование деформации композитных материалов на основе метастабильных сплавов системы железо-хром-никель методом корреляции цифровых изображений / Э.Д. Ишкиняев [и др.] // Журнал Технической Физики. – 2023. – Т. 93. – № 5. – С. 1152-1157. DOI: 10.21883/JTF.2023.08.55977.84-23

2. Механические свойства композитных материалов на основе сплава Fe – 18% Cr – 10% Ni, полученных с применением термической обработки лазерным излучением / Е.Н. Блинова [и др.] // Металловедение и термическая обработка

металлов. – 2023. – № 5. – С. 18-24. DOI: 10.30906/mitom.2023.5.18-23

3. Повышение эксплуатационных свойств поверхностей металлов с применением высокомошных волоконных лазеров / Э.Д. Ишкиняев [и др.] // Технология машиностроения. – 2023. – № 3. – С. 19-28. DOI: 10.34641/ТМ.2023.249.3.018

4. Determining the Size of the Hardening Zone by Temperature Fields during Laser Processing / E.D. Ishkinyaev [et al.] // Physics of Atomic Nuclei. – 2022. – Vol. 85. – № 12. – P. 2092-2098. DOI: 10.1134/S1063778822100210

5. Сравнительный анализ характеристик бандажей колёсных пар, закалённых с использованием лазерного и плазменного источника тепла / Е.В. Хриптович [и др.] // Мир Транспорта. – 2022. – Т. 20. – № 3. – С. 6-12. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-3-1>

6. Modeling of laser surface modification processes of tool steel to predict the temperature distribution and modification zone / E.D. Ishkinyaev [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2036. DOI: 10.1088/1742-6596/2036/1/012038

7. Study of Mechanical Characteristics of Stainless Steel Samples Obtained by Direct Laser Deposition / E.D. Ishkinyaev [et al.] // Physics of Atomic Nuclei. – 2019. – Vol. 82. – № 11. – P. 1441-1444. DOI: 10.1134/S1063778819110048

8. Эволюция структуры сплавов на основе системы Al-Fe-Ni, полученных технологией прямого лазерного наплавления / И.С. Логинова [и др.] // Технология легких сплавов. – 2019. – № 2. – С. 5-13.

9. Microstructure and mechanical properties of stainless steel 316L obtained by Direct Metal Laser Deposition / D.P. Vykovskiy [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1238. DOI: 10.1088/1742-6596/1238/1/012029

10. Прямое Лазерное Выращивание Объектов Из Градиентных Материалов С Использованием Растворимых Поддержек / Э.Д. Ишкиняев [и др.] // Ядерная Физика И Инжиниринг. – 2018. – Т. 9. – № 4. – С. 340-345. DOI: 10.1134/s2079562918040085

Список использованной литературы

1. Григорьянц А.Г. Технологические процессы лазерной обработки / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров. – Москва: МГТУ им. Баумана, 2006. – 664 с.
2. Попов В. Лазерное упрочнение сталей: сравнение волоконных и СО₂-лазеров / В. Попов // Фотоника. – 2009. – Т. 16. – № 4. – С. 18-21.
3. Laser surface hardening of 42CrMo cast steel for obtaining a wide and uniform hardened layer by shaped beams / P. Sun [et al.] // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 70. – № 5-8. – P. 787-796.
4. Comparative study of laser surface hardening of 50CrMo4 steel using continuous-wave laser and pulsed lasers with ms, ns, ps and fs pulse duration / N. Maharjan [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2019. – Vol. 366. – P. 311-320.
5. Study on hardening and deformation in laser hardening for small and thin parts: effects of dummy irradiation method / K. Ogawa [et al.] // Advances in Materials and Processing Technologies. – 2019. – Vol. 5. – № 3. – P. 379-385.
6. Ki H. Laser transformation hardening of carbon steel sheets using a heat sink / H. Ki, S. So, S. Kim // Journal of Materials Processing Technology. – 2014. – Vol. 214. – № 11. – P. 2693-2705.
7. Determining the Size of the Hardening Zone by Temperature Fields during Laser Processing / E.D. Ishkinyaev [et al.] // Physics of Atomic Nuclei. – 2022. – Vol. 85. – № 12. – P. 2092-2098.
8. Effect of heat source parameters on weld formation and defects of oscillating laser-TIG hybrid welding in horizontal position / M. Wu [et al.] // Journal of Manufacturing Processes. – 2022. – Vol. 83. – № August. – P. 512-521.
9. Minimizing defects and controlling the morphology of laser welded aluminum alloys using power modulation-based laser beam oscillation / J. Han [et al.] // Journal of Manufacturing Processes. – 2022. – Vol. 83. – № August. – P. 49-59.
10. Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review / Y. Kok [et al.] // Materials and Design. – 2018. – Vol. 139. – P. 565-586.

11. Shaped laser beam profiles for heat conduction welding of aluminium-copper alloys / M. Rasch [et al.] // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2019. – Vol. 115. – № November 2018. – P. 179-189.
12. Dynamic control of laser beam shape for heat treatment / P. Sancho [et al.] // *Journal of Laser Applications*. – 2018. – Vol. 30. – № 3. – P. 032507.
13. Nath A.K. *Laser Transformation Hardening of Steel* / A.K. Nath, S. Sarkar. – Second Edi. – Elsevier Ltd., 2017. – 257-298 p.
14. Leblond J.B. A new kinetic model for anisothermal metallurgical transformations in steels including effect of austenite grain size / J.B. Leblond, J. Devaux // *Acta Metallurgica*. – 1984. – T. 32. – № 1. – C. 137-146.
15. Fanfoni M. The Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov model: A brief review / M. Fanfoni, M. Tomellini // *Nuovo Cimento della Societa Italiana di Fisica D - Condensed Matter, Atomic, Molecular and Chemical Physics, Biophysics*. – 1998. – T. 20. – № 7. – C. 1171-1182.
16. Koistinen D.P. A general equation prescribing the extent of the austenite-martensite transformation in pure iron-carbon alloys and plain carbon steels / D.P. Koistinen, R.E. Marburger // *Acta Metallurgica*. – 1959. – T. 7. – № 1. – C. 59-60.